

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局



(43) 国際公開日
2005 年10 月20 日 (20.10.2005)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2005/098966 A1

- (51) 国際特許分類⁷: H01L 31/0216
(21) 国際出願番号: PCT/JP2005/006660
(22) 国際出願日: 2005 年4 月5 日 (05.04.2005)
(25) 国際出願の言語: 日本語
(26) 国際公開の言語: 日本語
(30) 優先権データ:
特願2004-111403 2004 年4 月5 日 (05.04.2004) JP
(71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 日本電気株式会社 (NEC CORPORATION) [JP/JP]; 〒1088001 東京都港区芝五丁目7番1号 Tokyo (JP).
(72) 発明者; および
(75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 大橋 啓之

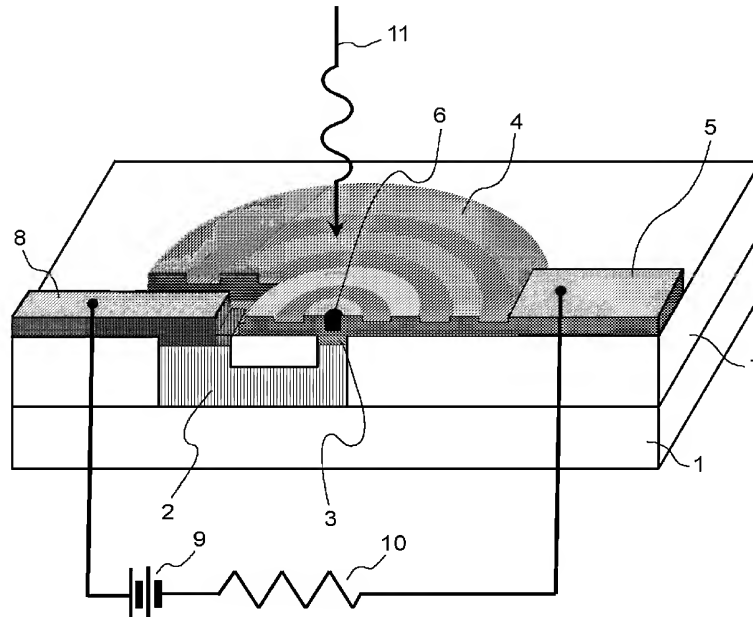
(OOHASHI, Keishi) [JP/JP]; 〒1088001 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内 Tokyo (JP). 石勉 (ISHI, Tsutomu) [JP/JP]; 〒1088001 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内 Tokyo (JP). 馬場 寿夫 (BABA, Toshio) [JP/JP]; 〒1088001 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内 Tokyo (JP). 藤方 潤一 (FUJIKATA, Junichi) [JP/JP]; 〒1088001 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内 Tokyo (JP). 牧田 紀久夫 (MAKITA, Kikuo) [JP/JP]; 〒1088001 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内 Tokyo (JP).

(74) 代理人: 宮崎 昭夫, 外(MIYAZAKI, Teruo et al.); 〒1070052 東京都港区赤坂1丁目9番20号 第16興和ビル8階 Tokyo (JP).

[続葉有]

(54) Title: PHOTODIODE AND METHOD FOR MANUFACTURING SAME

(54) 発明の名称: フォトダイオードとその製造方法



(57) Abstract: A Schottky photodiode comprises a semiconductor layer, and a conductive film provided in contact with the semiconductor layer. The conductive film has a hole, and a periodic structure provided around the hole and bringing about a resonance state on the film surface by a surface plasmon excited by an incident light to the surface of the conductive film. The photodiode senses an evanescent light generated on the interface between the conductive film and the semiconductor layer by the excited surface plasmon. The hole has a diameter smaller than the wavelength of the incident light.

(57) 要約: ショットキーフォトダイオードは、半導体層と、半導体層に接して設けられた導電膜と、を有する。導電膜は、穴と、穴の周囲に設けられ、導電膜の膜面に対する入射光によ

[続葉有]

WO 2005/098966 A1



(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ,

BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告書

2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

って、励起された表面プラズモンによる共鳴状態を膜面に生じさせる周期構造とを有する。フォトダイオードは、励起された表面プラズモンによって導電膜と半導体層との界面に発生する近接場光を検出する。穴は、入射光の波長より小さな直径を有する。

明 細 書

フォトダイオードとその製造方法

技術分野

[0001] 本発明は、赤外光などの非可視光を含む光の信号を高速に電気信号に変換するフォトダイオードと、その製造方法に関する。

背景技術

[0002] 光信号を電気信号に高速に変換するデバイスとして、フォトダイオードが多く用いられている。フォトダイオードは、情報処理分野および通信分野において必須のデバイスとなっている。

[0003] いくつかの種類のフォトダイオードが知られているが、高速に動作するフォトダイオードとして代表的なものに、pin型フォトダイオードがある。pin型フォトダイオードは、図1に示すように、シリコンなどの半導体によって構成されており、i層（真性半導体層）51をp層（p型半導体層）52およびn層（n型半導体層）53ではさんだ構造になっている。p層52は、i層51の表面の一部に薄く形成されており、p層52の周縁部を囲んでp層52に接するように、中央部にも窓59が形成された第1の電極（アノード電極）54が設けられている。n層53のi層51側でない表面には、第2の電極（カソード電極）55が設けられ、窓59の底面にはp層52が露出するとともに、p層52の露出表面には反射防止膜58が設けられている。

[0004] バイアス電源56に対して負荷抵抗50とこのpin型フォトダイオードとが直列に接続しており、第1の電極54側が負、第2の電極55側が正になるように、バイアス電源56によりフォトダイオードに逆バイアス電圧を加えると、高抵抗のi層51のほぼ全域が電荷キャリアの空乏層になる。この状態で窓59を介して入射光57がフォトダイオード内に入射すると、入射光57の光子は主にi層51で吸収されて電子－正孔対を生成する。発生した電子および正孔は逆バイアス電圧により空乏層内を各々反対の方向にドリフトして電流を生じ、負荷抵抗50の両端で信号電圧として検出される。

[0005] このようなpin型フォトダイオードで光電変換の応答速度を制限する要因の主なものは、負荷抵抗50と空乏層が作る電気容量との積で決まる回路時定数と、空乏層を電

子および正孔が通過するのに要するキャリア走行時間である。したがって、応答時間を向上させるためには、回路時定数を小さくするか、キャリア走行時間を短くすればよいことになる。

[0006] キャリア走行時間を短くして応答速度を向上させるために、ショットキー型のフォトダイオードが用いられる場合がある。ショットキーフォトダイオードは、図2に示すように、シリコンなどの半導体からなり、 n^+ 型半導体層60上に n^- 型半導体層61が形成され、さらに、 n^- 型半導体層61の表面の一部に、 n^- 型半導体層61に接するように半透明金属膜66が設けられている。半透明金属膜66は、入射光67が透過する程度に薄い金属膜である。半透明金属膜66の周縁部を囲んで半透明金属膜66に接するように、中央部にも窓69が形成された第1の電極62が設けられている。 n^+ 型半導体層60の n^- 型半導体層61側でない表面には、第2の電極63が設けられ、窓69の底面には半透明金属膜66が露出するとともに、半透明金属膜66の露出表面には反射防止膜68が設けられている。第1の電極62及び第2の電極63には、図1に示したpin型フォトダイオードの場合と同様に、バイアス電源64及び負荷抵抗65を介して、逆バイアス電圧が印加される。

[0007] このようなショットキーフォトダイオードでは、 n^- 型半導体層61の半透明金属膜66に接する界面付近にはショットキー障壁ができる。このショットキー障壁付近では、半透明金属膜66から n^- 型半導体層61に向かって電子が拡散して空乏層になる。この状態で入射光67が照射されると、 n^- 型半導体層61に電子が生成され、この電子は逆バイアス電圧により空乏層内をドリフトする。電子が空乏層内をドリフトすることによって電流が生じ、負荷抵抗65の両端で信号電圧として検出される。

[0008] 図1に示したようなpin型フォトダイオードでは、光子吸収のためのi層51すなわち空乏層に十分な厚みを持たせる必要があるのに対し、ショットキーフォトダイオードでは空乏層を薄くすることが可能であるため、キャリア走行時間を短くすることができる。また、ショットキーフォトダイオードでは、素子表面層での光吸収を有効に利用することができる。

[0009] 一方、光電変換の応答速度を向上させるために回路時定数を小さくする場合、負荷抵抗値を小さくするか、空乏層の電気容量を小さくすればよいことになる。しかしな

がら、回路時定数を短くするために負荷抵抗の値を小さくすると、取り出せる再生信号の電圧レベルが低下し、熱雑音その他の雑音の影響を受けやすくなってSN比(信号対雑音比)が悪化する。そのため、空乏層の電気容量を減らすことが、再生信号のSN比を良くして読み取りエラーを減らすために必要なことがらである。特に、キャリア走行時間を短くするために空乏層を薄くすると電気容量は増加することから、高速化のためには空乏層あるいはショットキー接合の面積を減らす必要がある。しかし、接合面積を減らすことは信号光の利用効率を低下させるため、これまた、再生信号のSN比を劣化させるという問題を生ずる。信号光の利用効率を向上させるために、レンズ等を用いて集光することも可能であるが、レンズを設けることは光電変換デバイス自体のサイズを大きくしてしまい、また、レンズとフォトダイオードとの位置合わせや、レンズと光ファイバなどとの位置合わせの作業が煩雑である、という問題点を生じる。

[0010] これらの課題に対し、近年の技術の発展に伴い、この種の光電変換デバイスにおいて、金属表面プラズモンを利用して従来よりもデバイスを高速化・小型化するための種々の試みが行われている。

[0011] 特開昭59-108376号公報(特許文献1)には、半導体の同一面上に2つの電極を設置した金属/半導体/金属(MSM)デバイスからなる光検出器が開示されている。このMSM型光検出器は、一般に、2つの電極付近にショットキー障壁を持ったショットキーフォトダイオードの一種である。電極を透過した光の一部は半導体で吸収されて自由電子を生成する。このようなMSM型光検出器においては、量子効率を上げる目的で半導体を厚くすると電子の伝播距離が増すために動作速度が低下するという問題が現れる。この動作速度低下を防ぐため、特開昭59-108376号公報では、金属の電極を周期的な凹凸に沿って設けることで、入射光を金属電極の表面プラズモンと効率よく結合させて光検出器内に伝播させる仕組みが開示されている。上述したようなMSM型受光素子の製造に適する方法として、特開平8-204225号(特許文献2)には、半導体上に金属膜を形成し、その一部を酸化して光透過性絶縁パターンを形成する方法が開示されている。

[0012] 近接場光を検出するようにした受光素子が提案されている。特開平8-204226号

公報(特許文献3)には、半導体の同一面上に一对の導電性電圧印加部材を有する MSM型受光素子において、一对の導電性電圧印加部材を隔てる光透過性の絶縁パターンの幅を波長以下の寸法にし、光透過性絶縁パターンの両脇にある導電性電圧印加部材の端部から発生する近接場光を利用することで、光検出の応答速度を高めることが開示されている。導電性電圧印加部材は、一般に、金属膜で構成されている。この構成では、近接場光を発生させるための開口の幅が効率を決定し、空乏層における電子が電子がドリフトする距離は応答速度を決定するが、光透過性絶縁パターンの幅がそのままショットキーダイオードとしての空乏層の幅となってしまうので、開口の幅と電子がドリフトする距離とを独立に設定することができず、受光素子における高効率と高速性を同時に得ることはできない。

[0013] 特表平10-509806号公報(特許文献4)には、表面プラズモン現象を利用した光電子カプラが開示されている。この光電子カプラでは、半導体上に、規則的な間隔を持って並ぶ交差指型の金属電極を正極と負極が入れ子になって向かい合うように配置するデバイス構造が用いられている。このようなデバイス構造により、入射光と透過光、反射光、表面プラズモンなどが相互に共振により結合する。光電子カプラ技術を用いたこの種のMSM型受光素子では、入射光によって生成する自由電子が入射光と表面プラズモンとの結合により強められるが、空乏層の電気容量を減らすために入射光の照射面積を減らすと、検出信号の強度が低下しSN比が低下する。

[0014] 特開2002-76410号公報(特許文献5)には、太陽光エネルギーなどを電気エネルギーに変換する光起電力デバイスにおいて、pn接合を持つ複数の球形状または半球状の微細な半導体を用い、各半導体球をそれぞれ1対の電極で挟み、1対の電極の一方には周期的に配列させた開口あるいは凹部を設けたものが開示されている。一方の電極に設けられた周期的な形状によって、入射光と表面プラズモンとが共鳴し、それによって光起電力デバイス全体としての光電変換効率が向上する。しかしながら、この技術は、光電変換の応答速度における高速性が要求されない光起電力デバイスすなわち太陽電池に関するものである。したがって、光電変換の高速化のために空乏層を薄くするとか、光電変換領域の面積を小さくするといったことについての検討はなされていない。

- [0015] 入射光と表面プラズモンとの相互作用を用いたデバイスとして、さらに、特開2000－171763号公報(特許文献6)には、開口部と周期的に変化する表面形状を有する金属フィルムとを利用して、開口部を伝播する光の強度を大幅に増大させた光伝送装置が開示されている。この公報には、単一の開口であってもその周囲に周期的な溝の列を設けることで、周期的な溝の列がない場合と比較して、開口を伝播する光を増強できることが述べられている。ただし、表面プラズモン共鳴においては、透過する光の総エネルギーは入射光エネルギーに比較して減衰することが知られている。Tineke Thio, H J Lezec, T W Ebbesen, K M Pellerin, G D Lewen, A Nahata, R A Linke, "Giant optical transmission of sub-wavelength apertures: physics and applications," Nanotechnology, vol. 13, pp. 429-432(非特許文献1)によれば、波長の40%以下の直径を有する開口において透過する光の総エネルギーは、表面プラズモン共鳴を利用したとしても、入射光エネルギーの1%以下に減衰する。したがって、特開2000－171763号に開示の光伝送装置を用い、その光伝送装置の開口から伝播してきた光を受光素子に照射したとしても、光電変換における高いSN比は得られない。
- [0016] 特開2001－291265号公報(特許文献7)には、光データ記憶媒体における記録密度の向上のために近視野光学系を使用することとして、波長以下の直径を有する開口を介して光記録媒体に光を照射するとともに、上述したような表面プラズモン共鳴によって開口を透過する光の強度を強めた、光データ記憶媒体用の読み出し／書き込みヘッドが開示されている。特開2004－61880号公報(特許文献8)には、上述した特開2001－291265号公報に開示の読み出し／書き込みヘッドは、開口を透過して遠方まで伝播する透過光を利用しているのではなく、開口に近接して形成される、近接場光(エバネッセント光)による微小な光スポットを用いていることが示されている。光データ記憶媒体の場合、記憶媒体での光の吸収係数を高くすることができ、したがって、記憶媒体では、近接場光による光スポットのような微小な範囲で全ての光子を吸収でき、微小な記録ピットを形成できるものと考えられる。しかしながら、近接場光をフォトダイオードに導入した場合、フォトダイオードを構成する材料の光吸収係数が比較的小さいので、フォトダイオード中の深い位置まで光が入射し

ない場合には、十分な光検出電流が観測されないものと考えられていた。

[0017] 以下、本明細書中で引用した参考文献を列举する。

特許文献1:特開昭59-108376号公報

特許文献2:特開平8-204225号公報

特許文献3:特開平8-204226号公報

特許文献4:特表平10-509806号公報

特許文献5:特開2002-76410号公報

特許文献6:特開2000-171763号公報

特許文献7:特開2001-291265号公報

特許文献8:特開2004-61880号公報

非特許文献1:Tineke Thio, H. J. Lezec, T. W. Ebbesen, K. M. Pellerin, G. D.

Lewen, A. Nahata, R. A. Linke, "Giant optical transmission of sub-wavelength apertures: physics and applications," Nanotechnology, vol. 13, pp. 429-432

発明の開示

発明が解決しようとする課題

[0018] フォトダイオードの応答を高速化するためには、空乏層を薄くしてキャリア走行時間を短くすること、および空乏層の面積を小さくして回路時定数を小さくすることが必要となる。しかし、これらの方策を採用した場合には、入射光の光子を電子-正孔対に変換する量子効率、すなわち信号光の利用効率が低下するため、SN比の低下を伴うという問題が生ずる。特に、空乏層の面積を小さくするために光の入射窓の大きさを波長程度以下のサイズにすると、回折限界により透過する光の強度は大幅に減衰してしまう。このため、フォトダイオードの接合面積を $1\mu\text{m}^2$ 以下にすることはほとんど不可能であった。金属膜に開口を設けるとともに、開口の周辺の金属膜に周期構造を設け、表面プラズモン共鳴を利用して開口を透過する光の強度を向上させ、このようにして強度が高められた光をフォトダイオードに導入することとしても、十分な光強度は得られず、SN比の低下を伴うことになる。金属膜に設けられた開口の近傍に形成される近接場光を検出しようとしても、フォトダイオードを構成する半導体材料の光吸収係数が比較的小さいため、十分な光強度が得られないものと考えられている。

[0019] この種の受光素子においては、信号光がない場合にも流れる暗電流が、ノイズ源として問題になる。暗電流は、熱による電荷キャリアの生成などにより流れるため、温度依存性が大きい。電子－正孔対を生成する領域の体積が大きいほど、暗電流は多くなる。さらに、ショットキー型のフォトダイオードでは、金属と半導体とを格子整合させることができないため、ある種の格子欠陥が空乏層に生ずる。この欠陥は、電荷キャリアの生成中心となり、暗電流を増やす方向に作用する。

[0020] 本発明の目的は、フォトダイオードの信号強度を確保しながら応答速度を高速化するためのデバイス構造を提供することにある。

[0021] 本発明の別の目的は、従来に比べてデバイスを大幅に小型化することによって集積化が容易な構造を与えるとともに、高速化、低消費電力化、および低ノイズ化が可能なフォトダイオードを提供することにある。

課題を解決するための手段

[0022] 本発明の第1の態様によれば、フォトダイオードは、入射光の波長よりも小さな直径を有する穴と、穴の周囲に設けられ導電膜の膜面に対する入射光によって、励起された表面プラズモンによる共鳴状態を膜面に生じさせる周期構造と、を有する導電膜と、導電膜の穴近傍に導電膜と接して設けられた半導体層と、を有し、励起された表面プラズモンによって導電膜と半導体層との界面において発生した近接場光を検出することを特徴とする。このフォトダイオードにおいて、穴の直径は、好ましくは、入射光の波長の $1/10$ 以上 $1/2$ 以下である。好ましくは、導電膜と半導体層によって形成されるショットキー障壁が現れる領域は、近接場光の発生領域とがほぼ一致する。周期構造は、好ましくは、穴から遠ざかる方向に周期を有する凹凸からなる。

[0023] 本発明の第2の態様によれば、フォトダイオードは、第1の面と第2の面とを有する導電膜であって、第1の面側から形成された入射光の波長より小さな直径を有する穴と、穴から遠ざかる方向に周期を有する凹凸からなる周期構造とを有する導電膜と、導電膜の穴近傍に導電膜の第2の面と接して設けられた一導電型の第1の半導体層と、第1の半導体層の導電膜の第2の面と接している面と反対側の面に接し、一導電型であって、第1の半導体層より不純物濃度が高い第2の半導体層と、からなることを特徴とする。

- [0024] さらにフォトダイオードは、第2の半導体層の導電膜との接合部の近傍にショットキー障壁を形成するための逆バイアス電圧を印加するために、第1の半導体層に電氣的に接続する第1の電極と、導電膜に電氣的に接続する第2の電極とを有してもよい。また、第1の半導体層と導電膜とに挟まれた第2の半導体層の厚さは、第2の面から導電膜に光が照射されたときに穴の位置で第1の面側に現れる近接場光の滲み出しの長さ以下とすることが好ましい。具体的には、第2の半導体層の厚さは、例えば、50nm以上100nm以下である。
- [0025] このフォトダイオードにおいて、導電膜は好ましくは金属膜からなり、凹凸は好ましくは第1の面に形成される。周期構造は、例えば、穴を中心とする同心円状の溝部からなる。穴は、入射光の波長の $1/10$ 以上 $1/2$ 以下の直径を有することが好ましい。
- [0026] 本発明のフォトダイオードでは、第2の半導体層と導電膜とからなるショットキー接合から入射光の波長より短い距離だけ離れた場所に、入射光の波長より小さな寸法を持つ導電性の部材を有しても良い。
- [0027] 本発明のフォトダイオードは、導電膜の第1の面に、第2の半導体層とほぼ同じ屈折率を有する透明膜を備えてもよく、さらに、入射光に対する反射防止膜を備えていてもよい。
- [0028] 周期構造の周期は、入射光の波長以下とすることが好ましく、あるいは、入射光によって導電膜に励起される表面プラズモンの共鳴波長に設定されることが好ましい。
- [0029] 金属膜は、周期構造の凹部において、例えば、100nm以上1000nm以下の膜厚を有し、周期構造における凹凸の深さは、例えば、20nm以上200nm以下である。
- [0030] 本発明において、導電膜に形成される穴の平面形状は、円、楕円、長円、あるいは中央部がくびれた亜鈴型やスリット形状であってもよい。穴が楕円である場合には、その楕円の短径が入射光の波長以下となるようにすればよい。スリット状の穴を用いる場合には、スリットの対向する2辺間の距離が波長以下となるようにすればよい。
- [0031] さらに本発明において、導電膜と半導体層とによって形成されるショットキー接合の界面には、フォトダイオードの動作を妨げない範囲の絶縁物、例えば直径が2nm程度以下の膜状あるいはクラスタ状などの酸化物が存在してもよい。
- [0032] 本発明のフォトダイオードの製造方法は、穴と穴を中心とした周期的な凹凸とを有

する導電膜と、穴の底部の位置で導電膜と接合する半導体層とを有するフォトダイオードの製造方法であって、光電変換を行う領域が穴の底部に対応する位置に限定されるように半導体層を画定して形成する段階と、導電膜を形成する段階と、領域に整合させて導電膜に穴および凹凸を形成する段階と、を有する。

[0033] 一般に、波長以下の微小な穴を持つ金属膜に入射した光は、その開口をほとんど透過することができない。しかし上述したように、微小な穴の周囲に周期的な凹凸を設け、入射光と金属膜の表面プラズモンとが結合して共鳴状態を作ることができるようにすることにより、透過光強度を増強させることが可能であることが知られている。この効果はプラズモン増強と呼ばれる。ただし、前出のTineke Thioらの文献(非特許文献1)によれば、波長の40%以下の直径の開口において透過する光の総エネルギーは、入射光エネルギーの1%以下に減衰するため、微小な穴からの透過光を半導体に照射しただけでは実用的な高いSN比は得られない。

[0034] 一方、微小な穴の出口付近には近接場光(エバネッセント光)と呼ばれるフォトンが滲み出し状態が現れる。周期的な凹凸によるプラズモン増強は透過光の他にこの近接場光も大幅に増強することが考えられる。その結果、微小な穴の出口付近には、平面的な広がりでは穴の面積と同程度の範囲であって、滲み出し長(すなわち出口位置からの距離)としては100nm程度以下の狭い範囲で指数関数的に減衰する強い近接場光を生ずると予想される。この場合、微小な穴は貫通している必要はなく、底部に十nm程度の金属層が残っていてもよく、この金属層を超えて出口側に近接場光が生じる。極薄い金属層が残っている場合の穴の出口とは、金属層の表面のうち、穴の底面でない方の表面における、穴の位置に対応する位置のことを指す。この近接場光は、金属膜の周期構造や金属膜に接する物質の屈折率の影響を受けてその強度及び滲み出しの範囲が変化するが、出口側に半導体などの物質が存在する場合にも現れる。微小な穴付近に局在化した近接場光は半導体中においては通常の伝播光と同様に吸収されて電子-正孔対を生成すると考えられる。この近接場光に基づく電子-正孔対の生成は局在化された近接場光領域のみで行われるもので、通常の伝播光による光電流に足されるものである。従って、この近接場光からの電子-正孔対発生を伝播光による電子-正孔対よりも多くできれば、入射光エネルギー

一の大半を深さ100nm程度以下の極めて狭い近接場光領域において、光電流を発生することが可能になる。

[0035] そこで本発明者らは、プラズモン増強された近接場光を検出するショットキーフォトダイオードを作成し、波長830nmの光を入射した時の光電流を調べた。フォトダイオードでは、Si基板の表面に直径300nmの穴を有する厚さ200nmのAg膜が形成されるとともに、その穴の位置が光検出部となるようにした。Ag膜においては、穴の周囲に周期560nm、深さ50nmの同心円状の溝を設け、入射光がAg膜に入射したことによって表面プラズモンが励起し、表面プラズモン共鳴が生起するようにした。また、Si基板とAg膜との界面には、両者を密着させるために、厚さ10nmのCr層を介在させた。また、比較のため、Ag膜に同心円状の周期構造が設けられていないフォトダイオードも作成した。

[0036] 図3は、このフォトダイオードの逆バイアス電流と光電流との観測された関係を示している。図3において、破線Aは、Ag膜において同心円状の周期構造を有しないフォトダイオードについての光電流の実測値である。点線Bは、Ag膜において同心円状の周期構造を有するフォトダイオードにおける光電流の計算による予測値である。この予測値は、穴を通る透過光の強度について、表面プラズモン共鳴による増強率を推定し、その増強率から見積もられたものである。このとき、穴の直径は入射光の波長の36%であるとして、上述のTineke Thioらの文献(非特許文献1)のデータに基づき、表面プラズモン共鳴による増強率は約20倍であると推定した。実線Cは、Ag膜において同心円状の周期構造を有するフォトダイオードにおける光電流の実測値を示している。

[0037] 図3に示した結果から明らかなように、金属膜に波長より小さい穴が形成されている場合に、その周辺の金属膜において同心円状の周期構造がある場合の光電流の実測値は、透過光に対する増強率から見積もった値より大きい。特に、逆バイアス電圧が小さい場合には、表面プラズモン増強率よりも1桁以上大きな光電流が流れることが判明した。逆バイアス電圧が小さい場合に、光電流が予想よりも著しく大きくなることから、この現象は、Ag膜と半導体層との界面に形成される空乏層の厚さが小さいときに顕著になるといえ、そのような界面近傍に集中する光子場によるものと考えら

れる。すなわち、この大きな光電流の原因は、Tineke Thioらが見積もりに含めていなかった近接場光の影響であると考えられる。このように本発明者らは、実験により、微小な開口を用いた場合には、近接場光の寄与が透過光の寄与よりも予想以上に大きくなることを見出した。

[0038] 従来は、光子によって電子－正孔対が生成される半導体材料の光吸収係数が比較的小さく、そのため、近接場光ができる程度の領域内では、十分な数の電子－正孔対が形成されない、と考えられていた。これに対し、本発明者らによる実験結果から、図3に示されたように、プラズモン増強された微小開口付近の近接場光を利用することで、十分に光電変換効率が高く、かつ、極めて小さなフォトダイオードを作成することができることがわかる。

[0039] すなわち、近接場光の領域と空乏層領域とが重なるように、半導体基板上の金属膜の形状および半導体基板でのキャリア濃度を調整することで、近接場光の広がり程度の極めて狭い領域で、光子による電子－正孔対生成を十分に行うことができることになる。この場合、空乏層の面積あるいは接合面積としては近接場光の広がり程度のものでよく、また、空乏層の厚さとしても、近接場光の滲み出し長程度のものでよいので、高い量子効率を維持しながら、空乏層の面積、厚さとも従来のフォトダイオードに比べて劇的に小さくすることが可能になる。これにより、高い量子効率と高速な応答および暗電流の低減を同時に実現するフォトダイオードが得られることになる。

[0040] フォトダイオードを用いた光検出回路の通常の構成では、図1や図2に示したように、信号電圧を検出するためにフォトダイオードに接続される負荷抵抗と、フォトダイオード内の接合部の電気容量の積が、ほぼ、回路の時定数になる。本発明のフォトダイオードは、接合面積を小さくすることで電気容量を大幅に低減でき、その分、回路の時定数を小さくすることができて高速動作が可能になる。

[0041] 半導体としてn型Siを用いる場合、不純物濃度を 10^{17} cm^{-3} とすれば空乏層の長さは約100nmとなり、不純物濃度 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ とすれば空乏層の長さは300nm以上となる。Siの比誘電率が約12なので、ショットキー接合を挟む一対の電極の間隔を、空乏層の長さ以下の100nmとすれば、直径300nmの円形のショットキー接合を設けた場合の接合容量は0.1fFとなる。配線パターンに伴う寄生電気容量が、接合容

量の約100倍あると見込んだとしても、負荷抵抗 $50\ \Omega$ の場合、フォトダイオード回路のRC時定数は、0.5ps程度となり、このことから、300GHz以上という高速な応答が可能になることが見積もられる。

[0042] 一方、100nmの空乏層を通過するキャリアの走行時間から求められる応答周波数は、Siで期待される最高のドリフト速度 10^7 cm/s を用いた場合、約160GHzとなる。

[0043] 以上の見積もりから明らかなように、本発明のフォトダイオードを用いた回路は、光の吸収係数が比較的小さいSiを用いた場合であっても、100GHz以上の極めて高速な応答を可能にすることがわかる。また、従来のフォトダイオードを用いた回路と同一の時定数でよいとするのであれば、接合容量が小さい分だけ負荷抵抗を大きくできることから、より大きな信号電圧を得ることができる。さらに、本発明のフォトダイオードでは、空乏層の体積が小さいことにより、暗電流に基づくノイズも少なくなる。

[0044] 本発明のフォトダイオードを用いて検出可能な光の周波数範囲は、光子のエネルギーが半導体のエネルギーギャップよりも小さく、かつ、金属膜中の自由電子のプラズマ周波数以上である領域である。使用する半導体や金属膜の材質、表面周期構造の形状、金属膜の穴の直径などを選択することにより、可視光、近赤外光、遠赤外光を含む全ての電磁波領域の光の検出に、本発明のフォトダイオードを使用することが可能である。

発明の効果

[0045] 以上の説明から明らかなように、本発明によれば、接合電気容量が極めて小さいフォトダイオードを得ることができ、このフォトダイオードを使用することによって、高速応答する光電変換回路を作ることができる。また、フォトダイオードに直列に接続される負荷抵抗を大きくすることができるので、従来のものに比べて高い信号出力電圧を得ることが可能になる。高い信号出力電圧が得られるため、光電変換回路において後段側に設けられる増幅器の増幅率を小さくすることができ、あるいは増幅器を用いなくてもよいようになり、これにより、光電変換回路の構成を簡素化して製造コストを低減するとともに、消費電力の少ない光電変換回路を実現することができる。

図面の簡単な説明

[0046] [図1]図1は、従来のpin型フォトダイオードの構造の一例を示す断面図である。

[図2]図2は、従来のショットキーフォトダイオードの構造の一例を示す断面図である。

[図3]図3は、表面プラズモン共鳴によって増強された近接場光を検出するように構成されたフォトダイオードにおける逆バイアス電圧と光電流との関係を示すグラフである。

[図4]図4は、本発明の第1の実施形態のショットキーフォトダイオードの構造を示す一部破断斜視図である。

[図5]図5は、第1の実施形態のショットキーフォトダイオードの構造を示す拡大断面図である。

[図6]図6は、第1の実施形態のショットキーフォトダイオードの電極配置の例を示す平面図である。

[図7]図7A～図7Jは、第1の実施形態のショットキーフォトダイオードの製造工程を、順を追って示す図である。

[図8]図8は、第1の実施形態のショットキーフォトダイオードの第2の例を示す拡大断面図である。

[図9]図9は、図8に示した電極配置の平面図である。

[図10]図10は、第1の実施形態のショットキーフォトダイオードの第3の例を示す平面図である。

[図11]図11は、第1の実施形態のショットキーフォトダイオードの第4の例を示す拡大断面図である。

[図12]図12は、第1の実施形態のショットキーフォトダイオードの第5の例を示す拡大断面図である。

[図13]図13は、第1の実施形態のショットキーフォトダイオードの第6の例を示す拡大断面図である。

[図14]図14は、第1の実施形態のプレーナ型ショットキーフォトダイオードの第7の例を示す拡大断面図である。

[図15]図15は、本発明の第2の実施形態のショットキーフォトダイオードの構造を示す断面斜視図である。

[図16]図16は、本発明の第3の実施形態のショットキーフォトダイオードの構造を示す

す拡大断面図である。

[図17]図17は、第3の実施形態のショットキーフォトダイオードの第2の例を示す拡大断面図である。

[図18]図18は、本発明の第4の実施形態の光受信モジュールの構成を示す模式断面図である。

[図19]図19は、本発明の第5の実施形態の光インターコネクトモジュールの構成を示す模式断面図である。

符号の説明

- [0047] 1, 16, 24 基板
 2, 14, 25, 60 n^+ 型半導体層
 3, 15, 26, 61 n^- 型半導体層
 4, 17 金属周期構造体
 5, 19, 29, 54, 62 第1の電極
 8, 20, 31, 55, 63 第2の電極
 6, 18, 27 穴
 7, 30 絶縁層
 9, 21, 32, 56, 64 バイアス電源
 10, 22, 33, 50, 65 負荷抵抗
 11, 23, 57, 67 入射光
 12 スリット
 13 反射防止膜
 28 金属構造体
 40 散乱体
 51 i層
 52 p層
 53 n層
 59, 69 窓
 66 半透明金属膜

発明を実施するための最良の形態

[0048] [第1の実施形態]

本発明の第1の実施形態のショットキーフォトダイオードを説明する。第1の実施形態のショットキーフォトダイオードは、プレーナ型のフォトダイオードとして構成されている。図4はこのフォトダイオードの全体構成を示す一部破断斜視図であり、図5は、その断面を拡大して示す図である。

[0049] 図示されるショットキーフォトダイオードは、SOI (Silicon-On-Insulator) など表面が絶縁性である基板1の一部の上に形成された n^+ 型半導体層2と、 n^+ 型半導体層2の一部の上に設けた n^- 型半導体層3と、 n^- 型半導体層3に接し導電性を有する金属周期構造体4と、金属周期構造体4に接続する第1の電極(アノード電極)5と、第1の電極5に対向し n^+ 型半導体層2に接する第2の電極(カソード電極)8と、第1及び第2の電極5, 8間に逆バイアス電位を印加するバイアス電源9と、バイアス電源9と第1の電極5との間に挿入された負荷抵抗10と、を備えている。

[0050] 金属周期構造体4には、穴6が設けられている。後述するように穴6は貫通しておらず、金属周期構造体4が n^- 型半導体層3に接しているのは穴6及びその近傍の位置のみにおいてであり、また、 n^- 型半導体層3は、穴6及びその近傍の位置においてのみ、 n^+ 型半導体層2上に形成されている。その他の箇所では、金属周期構造体4と、 n^+ 型半導体層2や基板1との間には、絶縁層7が設けられている。第1の電極5は、絶縁層7上に設けられて金属周期構造体4と接続している。また、第2の電極8も絶縁層7上に設けられている。 n^+ 型半導体層2は、その一部が絶縁層7を貫通して絶縁層7の上面にまで現れており、その位置で、第2の電極8と接合している。

[0051] この構成では、入射光11は、ほぼ光を通さない金属膜としての金属周期構造体4に入射する。入射光11は、金属周期構造体4における表面プラズモンを励起してこの表面プラズモンと結合し、周期構造によって表面プラズモンとの共鳴状態をつくる。この共鳴状態の生成によって、金属周期構造体4の中心に位置する穴6の光入射面と反対側の半導体表面付近に強い近接場光を発生する。この近接場光は、穴6の付近の半導体側のショットキー障壁に伴う空乏層において、電子-正孔対を発生することによって光起電力を生ずる。入射光11の強度は、負荷抵抗10の両端の電位

差に変換される。

- [0052] 上述したように、金属周期構造体4の下部にある半導体部分は、基板1、電気伝導度の高い n^+ 型半導体層2、および n^+ 型半導体層2の上の一部に形成された n^- 型半導体層3から構成されている。 n^+ 型半導体層2は、例えば、Siに対して $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 以上の不純物イオンを注入することにより得られる。 n^- 型半導体層2は、不純物イオンを $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 程度含む半導体結晶を n^+ 型半導体基板2の上にエピタキシャル成長させることにより形成できる。具体的な製造工程については後述する。
- [0053] 金属周期構造体4は、AgあるいはAuなどのプラズモン損失の少ない材料によって形成されている。穴6は金属周期構造体4の中心部に設けられているが、金属周期構造体4には、この穴を中心として、同心円状の凹凸による周期構造が形成されている。金属周期構造体4の凹凸の周期は、表面プラズモンの共鳴波長であり、入射光すなわち信号光の周期より若干短い値に設定される。例えば800nmの光波長の場合、凹凸の周期は600nm程度である。凹凸の深さを20nm～200nm程度とすることで、表面プラズモン共鳴による効果が現れる。金属周期構造体4の膜厚は、最も薄くなる凹部でも光の透過がほとんどない100nm以上であることが好ましいが、厚くなりすぎると穴6付近の近接場光が弱くなるため、1000nm以下にする必要がある。第1の電極5は、絶縁層7上で金属周期構造体4と接続しているから、金属周期構造体4と同じ材料を用いて金属周期構造体4と同時に形成されるようにすればよい。
- [0054] 金属周期構造体4における凹凸の形状は、図2に示した矩形断面のものに限るものではなく、凸部の頂上が尖っており断面が三角形状をしたもの、あるいは側面が曲面を持ったものや角が丸いものなどであってもよく、そのような形状のものであっても、同様に表面プラズモン共鳴による効果が見られる。また、凹部の長さや凸部の長さの比も任意のものが可能である。この同心円状の凹凸は、1周期だけ設けても、すなわち穴6を囲む一重の円環構造を形成するだけでも、ある程度の効果が見られる。しかしながら、3周期以上、すなわち三重以上の同心円構造として設けることで、より大きな表面プラズモン共鳴の効果を得ることができる。入射光11は、金属周期構造体4の全体あるいは一部に照射される。
- [0055] 金属周期構造体4に n^- 型半導体層3が接する領域は、穴6の領域とほぼ重なるよう

に設定される。微小開口付近に現れる近接場光の発生領域は、穴6の径よりもやや広がることが多い。このため、通常は、金属周期構造体4とn⁻型搬送体層との接合領域は、穴6の直径に対し、リソグラフィ位置決め誤差程度、すなわち片側で10nm～500nm程度大きく設定される。逆に穴6が接合領域からはみ出して形成され近接場光の一部がn⁻型半導体層3の外側に現れても、フォトダイオードとしての動作は可能である。

[0056] 穴6は金属周期構造体4を完全には貫通しておらず、穴6の底には厚さ約10nmあるいはそれ以下の厚さの金属層が残されている。この金属層は、金属周期構造体4を形成する材料であるAg、Auなどの表面プラズモン損失の少ない材料、あるいはCrなどの密着層、あるいは両者の積層構造などからなる。また、この金属層は、部分的にピンホールなどの穴の開いた不完全な膜であってもかまわない。金属周期構造体4とn⁻型半導体層3の間に界面に沿ってショットキー障壁が現れる。近接場光の伝播距離は100nm程度以下であり、かつ最も強度の強い領域は、n⁻型半導体層3の深さ10nm程度の位置に局在化している。ショットキー障壁による計算上の空乏層幅は、ドナー不純物濃度を $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ にしたSiの場合、100nm程度になるため、ドナー不純物濃度をさらに上げてn⁻型半導体層3の厚さを50nm以下にすることが可能である。

[0057] n⁺型半導体層2は、不純物のドーピング濃度が $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上と高く、第2の電極とオーミック接触している。ただし、n⁺型半導体層2におけるドーピング濃度が $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ より若干低い場合であっても、n⁺型半導体層2と第2の電極とで形成されるショットキー障壁高さが金属周期構造体4とn⁻型半導体層3の間のショットキー障壁よりも相対的に低ければ、上述したものと類似のフォトダイオード動作が得られる。

[0058] 第1の電極5と第2の電極8は、バイアス電源9を介して負荷抵抗10に接続されているので、この回路構成では、入射光11の強度は負荷抵抗10の両端の電位差に変換される。

[0059] 図6は、絶縁層7上での金属周期構造体4、第1の電極5及び第2の電極8の相互の位置関係の一例を示している。ここに示す例では、第1の電極と第2の電極8は同一平面上に存在し、第2の電極8は、金属周期構造体4の同心円状の凹凸の一部を

切り欠いた箇所に入り込む形で配置されている。しかしながら、第1の電極5と第2の電極8は同一平面に形成されている必要はない。また、第2の電極8は、プラズモン増強を起こす必要がないため、AgやAuなどの第1の電極5と同じ材料を用いる必要はなく、例えば、Cu、Ni、W、Alなどを使用することができる。

[0060] 表面プラズモンにより近接場光が顕著に増強されるのは、穴6の形状が円形である場合には、穴6の直径が入射光の波長の半分から1/10の間程度の範囲にある時である。これは、穴6が波長と同程度あるいはそれより大きい場合には、光子エネルギーの大半が伝播光として穴6を通過するので、近接場光としてエネルギーを閉じ込めることができないからである。また穴6の直径が入射光の波長の1/10より小さいと、プラズモン増強を用いても、穴6の反対側へのエネルギー伝播が少なく、光子エネルギーの大半は反射されてしまう。したがって、例えば800nmの波長の入射光を用いる場合、穴の直径は、80nm～400nm程度であることが好ましい。穴6としては、円形のほかに、例えば、四角形、六角形、楕円形などの形状のものを使用することができる。

[0061] 上述したように金属周期構造体4がn⁻型半導体層3に接しているのは穴6の近傍のみにおいてであり、その他の箇所では、金属周期構造体4と各半導体層と間に絶縁層7が存在する。これは、光が届かない範囲にある空乏層は、光起電力には寄与せずに暗電流のみに寄与するからである。絶縁層7としては、SiO₂など通常の半導体プロセスで使われる材料を用いることができる。また、金属周期構造体4とn⁻型半導体層3とが空乏層の外側で不必要な寄生容量を形成して全体としての電気容量を増加させると、これにより、回路の応答速度が遅くなる。したがって暗電流を下げ応答速度を高めるためには、絶縁層7はなるべく厚く設定する必要がある。好ましくは、500nm以上の厚さにして寄生容量を1fF以下の値にすることが望まれる。絶縁層7の材料として、SiO₂にFやCなどをドーピングしたSiOFやSiOCなどの低誘電率絶縁膜を用いることも、寄生容量を小さくするためには有効である。

[0062] [製造方法]

次に、上述したフォトダイオードの製造方法について、半導体材料としてSiを用いる場合について説明する。図7A～図7Jは、第1の実施形態のフォトダイオードの製造

方法を順を追って示している。

- [0063] まず、図7Aに示すように、例えば SiO_2 からなる基板層1の一方の主面の全面に n^+ 型半導体層2が形成され、さらに n^+ 型半導体層2の表面の全面に n^- 型半導体層3が形成された基板を用意する。 n^+ 型半導体層2は、Si層に大してPイオンを $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上注入して、電気抵抗率を $10^{-4} \Omega \text{ cm}$ 台にしたものである。 n^- 型半導体層3は、化学気相法により、Pが $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 程度含まれるn型Siを n^+ 型半導体層2上に約100nmの厚さで堆積させたものである。
- [0064] 次に、図7Bに示すように、完成したフォトダイオードにおいて n^+ 型半導体層2が形成されているべき領域に合わせ、 n^- 型半導体層3の上にマスク701を形成する。マスク701は、化学気相法などで成膜した厚さ100nm～150nmの窒化シリコン上に所望の形状のフォトレジストを設け、その後、窒化シリコンをイオンエッチングすることなどにより得られる。続いて、図7Cに示すように、マスク701を用いて n^- 型半導体層3および n^+ 型半導体層2をエッチングする。このとき、マスク701が設けれていない領域では n^- 型半導体層3が完全に除去され、 n^+ 型半導体層2は大半が除去されて厚さが減じるようにすればよい。エッチングには半導体製造プロセスで良く知られた化学的ドライエッチングが用いられ、反応性ガスには CF_4 あるいは CF_4 と O_2 の混合ガスが用いられる。
- [0065] 次に、図7Dに示すように、マスク701をさらにパターニングして、穴6に対応するショットキー接続用の約 $1 \mu \text{ m}$ 径のマスク702と、 n^+ 型半導体層2のオーミック接続用のそれよりも大きなマスク703とする。マスク702、703は、イオンエッチングなどにより形成される。続いて図7Eに示すように、マスク701、702を用いて n^- 型半導体層3および n^+ 型半導体層2をエッチングすることで、ショットキー接続用のメサ704およびオーミック接続用のメサ705を形成する。その結果、 n^+ 型半導体層2および n^- 型半導体層3は、完成したフォトダイオードにおけるものと同じ形状になる。言い換えれば、ショットキー接続用のメサ704の領域、オーミック接続用のメサ705の領域、および両方のメサ704、705を結ぶ領域以外では、 n^+ 型半導体層2は完全に除去される。エッチングには半導体製造プロセスで良く知られた化学的ドライエッチングが用いられ、反応性ガスには CF_4 あるいは CF_4 と O_2 の混合ガスが用いられる。

- [0066] 次に、 n^- 型半導体層3および n^+ 型半導体層2を絶縁層7で埋め込む。絶縁層7は、例えば SiO_2 からなり、段差を埋め込むために基板側にイオンが引き込まれるようにしたプラズマ化学気相法であるバイアスCVDにより成膜される。 SiO_2 の成膜後、基板を約130℃の熱リン酸中に約1時間置くことで、マスク702, 703を除去する。図7Fは、マスク702, 703を除去した後の基板を示している。メサの形状や酸化プロセスを最適化することでかなり平坦な表面を得ることができるが、メカノケミカルポリッシング(CMP)等による研磨技術を用いることによって、より平坦な表面にすることも可能である。
- [0067] 次に、図7Gに示すように、オーミック接続のメサ705の上の n^- 型半導体層3を化学的イオンエッチング等により除去する。引き続き、図7Hに示すように、金属周期構造体4、第1の電極5および第2の電極8となるべき位置に、金属層パターン706を設ける。この金属層パターン706は、電気抵抗率の低い材料からなることが好ましい。また、金属周期構造体4の穴6における信号光の透過率が高く保たれ、また表面プラズモンによる増強効果を妨げないようにするために、200nm以下の膜厚であることが好ましい。Agなど、Siとの密着が悪い材料を金属層パターン706に用いる場合は、密着層として厚さ10nm以下より好ましくは3nm以下のCr、Ti、Ta、W、Niなどを、金属層パターン706に対する下地層として設けることもできる。金属層パターン706は、ショットキー接続メサ全体を覆うパターンとオーミック接続メサの一部を覆うパターンに分けて形成され、両者は電氣的に分離されている。
- [0068] 次に、図7Iに示すように、ショットキー接続用のメサ704の中央部の位置において金属層パターン706に穴6を形成する。さらに、金属層パターン706の上に、金属周期構造体4、第1の電極5および第2の電極8を成膜する。この時、金属層パターン706の形成位置以外には金属膜が成膜されないように、あらかじめフォトリソグのマスクを設けておく。電極を成膜したのち、不要の金属とともにフォトリソグマスクを除去する周知のリフトオフ法を実施することにより、金属周期構造体4、第1の電極5および第2の電極8が形成される。AgあるいはAuなど光領域での電気抵抗が小さく表面プラズモン損失の少ない材料を金属周期構造体および電極に用いることが好ましいが、第2の電極8に関しては、導電体であれば必ずしもAgあるいはAuである必要

はない。

- [0069] 引き続き、図7Jに示すように、リフトオフ法などで、電極と同じAgあるいはAuを付加金属層707として追加形成することにより、金属周期構造体4の表面にピッチPの周期的な凹凸を形成する。
- [0070] 以上のプロセスによって、図4～図6に示したフォトダイオードが完成する。
- [0071] 上述した第1の実施の形態において、フォトダイオードを構成する半導体材料として、Siの代わりに、Ge、SiGeなど他のIV族元素半導体を用いることができる。また、GaAs系やInP系のIII-V族化合物半導体などを用いることができる。これらの材料の選択は、バンドギャップと光の吸収係数とにより制限される波長限界に基づいて決められる。Siを用いた場合は、800nm～900nm付近の波長で、Geを用いた場合は1300nm～1500nm付近の波長で、InP上に成長させたInGaAsを用いた場合には1300nm～1600nm付近の波長で、それぞれ優れたフォトダイオード特性が得られる。Geを用いる場合は、SOI基板の代わりに超高真空化学気相法や分子ビームエピタキシー法などを用いて製造されたGOI(Germanium On Insulator)基板などが用いられる。なお、III-V族化合物半導体を用いてフォトダイオードを構成する場合には、絶縁性基板の代わりに半絶縁性基板を用い、半絶縁性基板上に n^+ 型のIII-V族化合物半導体層を形成したものをを用いることができる。たとえば半絶縁性半導体であるGaAs基板の上に n^+ 型GaAs層を形成し、さらにその表面の一部に n^- 型GaAs層を形成する。その n^- 型GaAs層に接してAg製の金属周期構造体が設置される。
- [0072] 次に、上述した第1の実施形態のフォトダイオードの別の構成例を説明する。
- [0073] 図8および図9は、第1の実施形態のショットキーフォトダイオードの第2の例を示している。このフォトダイオードは、図4～図6に示したフォトダイオードと同様のものであるが、同心円状の凹凸を有する金属周期構造体4に、第2の電極8が食い込んで設けられるための部分的な切り欠き部が設けられていない点で、図4～図6に示したフォトダイオードと相違する。
- [0074] 図10は、第1の実施形態のショットキーフォトダイオードの第3の例を示している。このフォトダイオードは、図4～図6に示したフォトダイオードと同様のものであるが、金

属周期構造体4が、図4～図6に示したものにおける金属周期構造体を帯状に切り取った形状を有し、このような帯状の金属周期構造体4を囲むように、金属周期構造体4の3辺に沿うように第2の電極8が形成されている点で、図4～図6に示したフォトダイオードと異なっている。

[0075] 図11は、第1の実施形態のショットキーフォトダイオードの第4の例を示している。このフォトダイオードは、図10に示すものと同様のものであるが、穴6の代わりに、細長いスリット12が形成されており、金属周期構造体の凹凸が同心円状ではなく平行な溝として形成されている点で、図10に示すフォトダイオードとは異なっている。スリット12の間隙は、入射光の波長の半分以下とすることが好ましく、スリット12の長手方向の長さは、入射光の波長以下とすることが好ましい。

[0076] 図12は、第1の実施形態のショットキーフォトダイオードの第5の例を示している。このフォトダイオードは、図4～図6に示したフォトダイオードとほぼ同じ構造を有するが、金属周期構造体4が n^- 型半導体層3と接する界面と、金属周期構造体4が絶縁層7と接する界面とが、ほぼ同一平面上にある点で相違する。ここではほぼ同一平面とは、二つの界面の段差が、光の波長に対し十分小さいこと、具体的には波長の $1/30$ 以下の大きさであることを意味する。このような構造を有するフォトダイオードは、ショットキー接続用のメサとオーミック接続用のメサを形成する際に、 n^+ 型半導体層の第1の電極に接する箇所と第2の電極に接する箇所とに別々のマスクを用いて、分子線エピタキシーあるいは超高真空化学気相法などにより、それぞれ、 n^- 型半導体層および n^+ 型半導体層を堆積することで製造することができる。この構造は、金属周期構造体4、第1の電極5、および第2の電極8の同時形成を容易にするという長所を有する。

[0077] 図13は、第1の実施形態のショットキーフォトダイオードの第6の例を示している。このフォトダイオードでは、上述した各例のフォトダイオードとは異なって、金属周期構造体4に設けられた穴6が完全に貫通し、穴6の底部に n^- 型半導体層3が露出しており、 n^- 型半導体層3に金属周期構造体4が接するのは穴の周囲であるという点である。穴6の直径が入射光の波長の半分以下であれば、穴6を透過する光の量は極めて少なく、穴6の反対側に現れる光子はほとんど近接場光の状態である。したが

って、この場合においても、穴6の底に金属層が存在する場合と同様の動作をするフォトダイオードを得ることができる。

- [0078] 図14は、第1の実施形態のショットキーフォトダイオードの第7の例を示している。このフォトダイオードは、図13に示したフォトダイオードと同様のものであるが、金属周期構造体4の上に、金属周期構造体4の表面の周期構造を全面的に覆うように、 n^- 型半導体層3とほぼ同じ屈折率を有する透明膜14が設けられている点で相違する。透明膜14を設けたことにより、穴6の出口側における光の反射を少なくしている。例えば、波長1300nmの信号光に対応したフォトダイオードを構成する場合、 n^- 型半導体層3として、SbをドーピングしたGeを用い、透明膜14として、SiあるいはSiGeを用いることで、このような構成を実現することができる。さらに図14に示したものでは、透明膜14上を反射防止膜13で覆ってさらに反射を減らしている。反射防止膜13には、透明膜14の屈折率の平方根に近い屈折率を有する材料を用いることが好ましい。透明膜14としてSiを用いた場合、反射防止膜13には、酸化ハフニウム(HfO_2)、五酸化タンタル(Ta_2O_5)などを用いることができる。

- [0079] [第2の実施形態]

次に、本発明の第2の実施形態のショットキーフォトダイオードについて説明する。第1の実施形態のフォトダイオードは、プレーナ型のものであったが、この第2の実施形態のフォトダイオードは、絶縁性の基板を用い、基板の表面に第1の電極、裏面に第2の電極を配したものである。図15は、第2の実施形態であるフォトダイオードの構成を示している。

- [0080] 絶縁性の基板16の表面には、第1の実施形態の場合と同様に、中心に穴18が設けられているとともに、穴18の周りに同心円状の凹凸による周期構造を有する金属周期構造体17が形成されている。図4～図6に示したフォトダイオードと同様に、穴18は金属周期構造体17を完全には貫通していない。基板16の表面には、さらに、金属周期構造体17と電氣的に接続する第1の電極(アノード電極)19が設けられている。

- [0081] 穴16の位置に対応して、基板16には貫通孔が形成されており、この貫通孔を挟んで基板16の反対側の表面には、第2の電極(カソード電極)20が設けられている。基

板16に形成された貫通孔内には、第2の電極20とオーミックに接合する n^+ 型半導体層14と、 n^+ 型半導体層14上に形成された n^- 型半導体層15とが設けられている。 n^- 型半導体層15は、基板16の表面に達し、金属周期構造体17と接している。

[0082] このフォトダイオードにおいては、金属周期構造体17や各電極19、20としては、第1の実施形態での第2の例から第7の例までで述べた構造や形状のものを使用することができる。

[0083] 第1の電極19と第2の電極20は、負荷抵抗22を介してバイアス電源21に接続しており、バイアス電源21からはこのフォトダイオードに対して逆バイアス電位が印加される。

[0084] このフォトダイオードにおいて、半導体材料としてSiを用いた場合、 n^+ 型半導体層14および n^- 型半導体層15は、そこにドーピングするAsの濃度を調整することで作成される。電極19、20には、例えばAgを用いることができる。このフォトダイオードにおいても、金属周期構造体17の同心円状凹凸の周期を700nmに設定することにより、入射する信号光の波長が800nm近辺の時に顕著なプラズモン共鳴が発生し、穴18付近から n^- 型半導体層15側に現れる近接場光は、その強度が飛躍的に高められるとともに、穴18の出口側の近傍に小さく閉じ込められるようになる。その結果、第2の実施形態においても、第1の実施形態の場合と同様に、量子効率の高いフォトダイオードを得ることができる。

[0085] [第3の実施形態]

次に、本発明の第2の実施形態のショットキーフォトダイオードについて説明する。図16に示す第3の実施形態のフォトダイオードは、第1の実施形態のフォトダイオードと同様のものであるが、金属周期構造体4に設けられた穴6の底面に、光を散乱するための微小な散乱体40を設けた点で相違する。この散乱体40には、光波長領域での電気抵抗が小さい材料が適しており、金属周期構造体4と同じ金属材料、例えばAgあるいはAuなどを用いることができる。散乱体40の体積および形状は、表面プラズモン共鳴の状態に影響を及ぼすが、散乱体40として、そのサイズが5nm角程度から入射光の波長と同程度のものまでが、幅広い範囲で効果を発揮する。形状としては、散乱体40は、例えば、円柱状、あるいは角柱状のものとすることができる。

- [0086] 散乱体40を穴6の底面に設けることにより、穴6の直径を大きくしながら、穴6の出口側での伝播光成分を減らして近接場光を増加させることが可能になる。具体的には、散乱体40と穴6の内壁との距離が入射光の波長の半分以上を超えない範囲で穴6を大きくすることができる。また、散乱体40と穴6の底面とは必ずしも接している必要はなく、入射光の波長以下の微小な距離だけ離れていてもよい。図示したものでは、穴6の底面を構成する金属層の上に、薄い誘電体層41を介して散乱体40が配置している。また穴は導電体を貫通していてもよく、図13に示した構造にも貫通穴の形態を適用することができる。
- [0087] 図17は、第3の実施形態におけるフォトダイオードの第2の例を示している。このフォトダイオードは、図16に示したものと異なり、微小な散乱体40が n^- 型半導体層3の最表面中に埋め込まれて存在する点である。この散乱体40にも光波長領域での電気抵抗が小さい材料が適しており、金属周期構造体4と同じ金属材料、例えばAgあるいはAuなどを用いることができる。この例においても、散乱体40の体積および形状は、表面プラズモン共鳴の状態に影響を及ぼすが、散乱体40として、そのサイズが5nm角程度から入射光の波長と同程度のものまでが、幅広い範囲で効果を発揮する。このフォトダイオードでは、 n^- 型半導体層3において散乱体40を穴6の底面の金属層に接して設けることで、伝播光成分を減らすと、同時にショットキー接合付近の半導体層内により強い近接場光を作り出すことが可能になる。
- [0088] なお、金属周期構造体4において穴6が貫通している構造のフォトダイオードに対しても、その穴6の内部に散乱体40を配置したり、あるいは n^- 型半導体層3の最表面に散乱体40を埋め込むことで、上述したものと同様の効果を得ることができる。
- [0089] [第4の実施形態]
- 次に、本発明のショットキーフォトダイオードを応用した例について説明する。図18は、本発明のショットキーフォトダイオードを用いた40Gbps (ギガビット毎秒) 伝送用の光受信モジュールを示している。
- [0090] モジュール筐体78内に外部から光ファイバ73が引き込まれている。モジュール筐体78内では、光ファイバ73の端面に対向して、本発明に基づくフォトダイオード71が配置するとともに、光ファイバ73の端面とフォトダイオード71の間には、光ファイバ

73とフォトダイオード71とを光学的に結合させ、光ファイバ73から出射した信号光77をフォトダイオード71の受光面に集光させるためのレンズ74が設けられている。フォトダイオード71は、チップキャリア72の側面に設けられており、電気配線76を介して、チップキャリア72の上面に設けられたプリアンプIC(集積回路)75と接続している。フォトダイオード71は信号光77を電気信号に変換し、電気配線76を介してその電気信号をプリアンプIC75に出力する。プリアンプIC75は、入力された電気信号を増幅する。

- [0091] フォトダイオード71は、InP上にInGaAs膜をエピタキシャル成長させた基板を用いて形成されており、InGaAs膜上にAgまたはAuからなる金属周期構造体を有する。このフォトダイオードを波長 $1.55\mu\text{m}$ の赤外光による伝送に用いる場合、金属周期構造体における凹凸周期は約 $1.2\mu\text{m}$ とすればよく、同心円状に8周期のリング状凹凸を形成した場合には、その外周の直径は約 $20\mu\text{m}$ となる。金属周期構造体における凹凸の深さは $0.1\sim 0.4\mu\text{m}$ 程度であることが好ましく、穴の直径は $0.3\sim 0.7\mu\text{m}$ 程度であることが好ましい。
- [0092] 従来の40Gbps伝送用の光受信モジュールでは、モジュール筐体内に搭載されるフォトダイオードとして、側面入射導波路型のものが多く用いられている。これは、半導体面に光を入射する面入射型のフォトダイオードでは、電荷キャリア走行時間を減らすために吸収層を薄くすると高い吸収効率が得られないからである。一方、導波路型は、吸収層の面内方向で光を吸収することにより、電荷キャリア走行時間が短いままで高い吸収効率が得られる。しかし、40Gbps用導波型素子においては、吸収層厚は、通常、 $1\mu\text{m}$ 以下であり、フォトダイオードと光ファイバとの位置合わせに関する結合トレランスを $\pm 1\mu\text{m}$ 程度にする必要がある。したがって、従来のフォトダイオードを用いた光受信モジュールは、実装設計および製造コストの両面で大きな問題点を有している。
- [0093] これに対し、本発明によるフォトダイオードは、受光面において $20\mu\text{m}$ の有効実効直径を有しており、このために結合トレランスを $\pm 2\mu\text{m}$ 以上にとることが可能となる。その結果、簡易なレンズ結合のみで光ファイバとフォトダイオードとの光結合を行うことができ、これにより伝送用光受信モジュールの低コスト化が可能になる。図18に示

した40Gbps伝送用の光受信モジュールでは、波長1.55 μ mを伝送する場合において最小受信感度-12dBmが得られた。本発明のフォトダイオードを用いることにより、導波路型フォトダイオードを搭載した従来の40Gbps伝送用の光受信モジュールと特性的にも何等遜色がないレベルの光受信モジュールを実現できることが確認された。

[0094] [第5の実施形態]

次に、本発明のショットキーフォトダイオードを応用した別の例について説明する。図19は、本発明のショットキーフォトダイオードを搭載したLSI(大規模集積回路)チップ間光インターコネクトモジュールを示している。

[0095] 配線ボード上に搭載されたLSI間で高速で信号伝送を行うために、LSI間を光ファイバで接続し、光信号で信号を伝送することが検討されている。LSI内での信号処理は電気信号を対象として行われるので、光ファイバと個々のLSIチップとの接続のために、光ファイバからの信号光を電気信号に変換してLSIチップ内に供給し、またLSIチップから出力する電気信号を光信号に変換してファイバに導入する光インターコネクトモジュールが必要となる。

[0096] 搭載ボード89の一方の表面には、本発明に基づくフォトダイオード81と電気変調機構を備えたVCSEL(面発光型半導体レーザ:Vertical Cavity Surface Emitting Laser)光源82とが設けられており、フォトダイオード81の受光面には、表面プラズモン共鳴によって近接場光の強度を増強するための金属周期構造体90が形成されている。搭載ボード89は、LSIチップを内蔵するLSIパッケージ87の表面に取り付けられている。LSIパッケージ87には、光源および変調用の電気配線のためのビア85と、フォトダイオード用の電気配線のためのビア86とが形成されている。ビア85は、搭載ボード89に形成され、VCSEL光源82に接続した電気配線層91と接続する。ビア86は、搭載ボード89に形成され、フォトダイオード81に接続した電気配線層92と接続する。

[0097] このような搭載ボード89に対向するように、LSI搭載ボード88が配置している。LSI搭載ボード88の表面は、光信号入力用の光ファイバ83と光信号出力用の光ファイバ84と、光ファイバ83の端面から出射した信号光をフォトダイオード81に向ける凹面

鏡93と、VCSEL光源82からの信号光を光ファイバ84に入射させる凹面鏡94とが設けられている。凹面鏡93は、光ファイバ83とフォトダイオード81とを光結合させ、凹面鏡94は、光ファイバ84とVCSEL光源82とを光結合させる。

- [0098] このような光インターコネクトモジュールでは、光信号入力用のファイバ83からの信号光は、凹面鏡93により金属周期構造体90に照射される。信号光として波長850nmの光を用いる場合には、フォトダイオード81に用いる半導体材料としてSiを使用し、金属周期構造体90における凹凸の周期は600nm～700nmとする。Si製のフォトダイオード81は、金属周期構造体90が作り出す近接場光により光電流を発生することで、フォトダイオード用の電気配線層92およびビア86を通して、光信号に対応した電流をLSIに流す。金属周期構造体90の働きにより、凹面鏡93とフォトダイオードの位置に関する結合トレランスは $\pm 1 \mu\text{m}$ 以上にとることが可能となる。ここで、フォトダイオード81の直後の位置において、電気配線層92の途中に、電気信号増幅のためのプリアンプを設けることもできる。
- [0099] LSIからの電気信号は、ビア85から電気配線層91を通過して、電気変調機構を備えたVCSEL光源82により光信号に変換される。光信号は、凹面鏡94で反射され、光信号出力用の光ファイバ84に導かれる。電気変調機構を備えたVCSEL光源82は、電気信号により光を変調する周知の他の機構、例えば、外部光源からの光を電気光学効果または熱光学効果により変調するマッハツェンダー型の変調器により、置き換えることができる。
- [0100] 以上説明した光インターコネクトモジュールにおいて、光信号の入力には、光ファイバの代わりに、平面光導波路など良く知られた他の構成を用いることができる。また凹面鏡93の代わりに凸レンズなどの集光機構を用いることもできる。
- [0101] ここで、LSIチップ間の接続に用いられる従来の光インターコネクトモジュールでは、20GHz以上の高速動作を目的とする場合、受光用のフォトダイオードとしては、高速応答のために、InP基板上に成長させたInGaAs等の化合物半導体材料などが用いられる。このような化合物半導体は、Si半導体装置の製造プロセスとの整合性が悪いため、従来の光インターコネクトモジュールでは製造コストが高くなるという問題点がある。

[0102] これに対し本実施形態の光インターコネクトモジュールでは、半導体材料としてSiを用いる本発明によるフォトダイオードを使用するため製造コストを引き下げることができる。図19に示した光インターコネクトモジュールを実際に製作したところ、約40GHzの高速光電気変換動作を実現することが確認された。

[0103] [他の実施形態]

以上、本発明の好ましい実施形態について説明したが、上述した各実施形態において、入射光をレンズで集光してから金属周期構造体上に照射するなど、従来良く知られた技術と本発明の技術とを組み合わせることができることは、当然のことである。

[0104] 金属周期構造体に設けられる穴の平面形状は、必ずしも円形やスリット形状に限定するものではなく、楕円、長円、亜鈴型さらには、正方形や長方形であってもよく、これらの形状を有する穴を用いても、上述と同様の効果を得ることができる。さらに、単一の穴を設ける代わりに、近接して複数の穴を配置することも可能である。

[0105] 穴の深さ方向に沿った断面の形状について、上述の実施形態では、金属周期構造体を貫通せずに穴の底面に金属層が残るものや、穴の底面の近傍に導電性の光散乱体を有するもの、底面がなく金属周期構造体を貫通するものなどを説明した。しかしながら穴の断面形状はこれらに限られるものではなく、上述の各例においてそれぞれ別の断面形状の穴を選ぶこともできる。したがって、穴の平面形状と断面形状の組み合わせは、例示したものを含めて任意の組み合わせが可能である。

請求の範囲

- [1] 入射光の波長よりも小さな直径を有する穴と、前記穴の周囲に設けられ前記導電膜の膜面に対する入射光によって、励起された表面プラズモンによる共鳴状態を前記膜面に生じさせる周期構造と、を有する導電膜と、
前記導電膜の前記穴近傍に前記導電膜と接して設けられた半導体層と、
を有し、前記励起された表面プラズモンによって前記導電膜と前記半導体層との界面において発生した近接場光を検出することを特徴とする、フォトダイオード。
- [2] 前記導電膜は、前記穴以外の場所では前記入射光を通さない金属膜である、請求項1に記載のフォトダイオード。
- [3] 前記導電膜と前記半導体層によって形成されるショットキー障壁が現れる領域は、前記近接場光の発生領域とほぼ一致する、請求項1または2に記載のフォトダイオード。
- [4] 前記周期構造は、前記穴から遠ざかる方向に周期を有する凹凸からなる、請求項1または2に記載のフォトダイオード。
- [5] 第1の面と第2の面とを有する導電膜であって、前記第1の面側から形成された入射光の波長よりも小さな直径を有する穴と、前記穴から遠ざかる方向に周期を有する凹凸からなる周期構造とを有する導電膜と、
前記導電膜の前記穴近傍に前記導電膜の第2の面と接して設けられた一導電型の第1の半導体層と、前記第1の半導体層の前記導電膜の第2の面と接している面と反対側の面に接し、前記一導電型であって、前記第1の半導体層より不純物濃度が高い第2の半導体層と、
からなることを特徴とするフォトダイオード。
- [6] 前記導電膜は金属膜からなり、前記凹凸は前記第1の面に形成されている、請求項5に記載のフォトダイオード。
- [7] 前記周期構造は、前記穴を中心とする同心円状の溝部からなる、請求項5に記載のフォトダイオード。
- [8] 前記第2の半導体層の前記導電膜との接合部の近傍にショットキー障壁を形成するための逆バイアス電圧を印加するために、前記第1の半導体層に電氣的に接続す

る第1の電極と、前記導電膜に電氣的に接続する第2の電極とを有し、

前記第1の半導体層と前記導電膜とに挟まれた前記第2の半導体層の厚さは、前記第2の面から前記導電膜に光が照射されたときに前記穴の位置で前記第1の面側に現れる近接場光の滲み出しの長さ以下である、請求項5乃至7のいずれか1項に記載のフォトダイオード。

- [9] 前記穴は、前記導電膜の一部である底面部を有する、請求項5乃至7のいずれか1項に記載のフォトダイオード。
- [10] 前記穴内に、導電性物質からなり光を散乱する散乱体が配置している、請求項5乃至7のいずれか1項に記載のフォトダイオード。
- [11] 前記穴の位置に対応して、前記底面部と前記第2の半導体層との界面から前記第2の半導体層側に埋め込まれた、導電性物質からなり光を散乱する散乱体を有する、請求項9に記載のフォトダイオード。
- [12] 前記穴は前記導電膜を貫通して前記第2の半導体層に達し、前記導電膜のうち前記穴の周縁部が前記第2の半導体層と接する、請求項5乃至7のいずれか1項に記載のフォトダイオード。
- [13] 前記穴の位置に対応し、前記第2の半導体層の表面に、導電性物質からなり光を散乱する散乱体が埋め込まれている、請求項12に記載のフォトダイオード。
- [14] 前記導電膜の前記第1の面に、前記第2の半導体層とほぼ同じ屈折率を有する透明膜を備える、請求項5乃至7のいずれか1項に記載のフォトダイオード。
- [15] 前記透明膜上に設けられた、入射光に対する反射防止膜をさらに有する、請求項14に記載のフォトダイオード。
- [16] 前記導電膜は金属膜であって、前記穴の直径は前記入射光の波長の $1/10$ 以上 $1/2$ 以下である、請求項5乃至7のいずれか1項に記載のフォトダイオード。
- [17] 前記周期構造の周期は前記入射光の波長以下である、請求項16に記載のフォトダイオード。
- [18] 前記周期構造の周期は、前記入射光によって前記導電膜に励起される表面プラズモンの共鳴波長に設定される、請求項16に記載のフォトダイオード。
- [19] 前記金属膜は、前記周期構造の凹部において100nm以上1000nm以下の膜厚

を有し、前記凹凸の深さは20nm以上200nm以下である、請求項16に記載のフォトダイオード。

[20] 前記第1の半導体層と前記導電膜とに挟まれた前記第2の半導体層の厚さは、50nm以上100nm以下である、請求項8に記載のフォトダイオード。

[21] 穴と前記穴を中心とした周期的な凹凸とを有する導電膜と、前記穴の底部の位置で前記導電膜と接合する半導体層とを有するフォトダイオードの製造方法であって、
光電変換を行う領域が前記穴の底部に対応する位置に限定されるように前記半導体層を画定して形成する段階と、
前記導電膜を形成する段階と、
前記領域に整合させて前記導電膜に前記穴および前記凹凸を形成する段階と、
を有するフォトダイオードの製造方法。

[22] 光ファイバから出射した信号光を検出して電気信号として出力する請求項1または5に記載のフォトダイオードと、
前記電気信号を増幅するプリアンプと、
を有することを特徴とする、光モジュール。

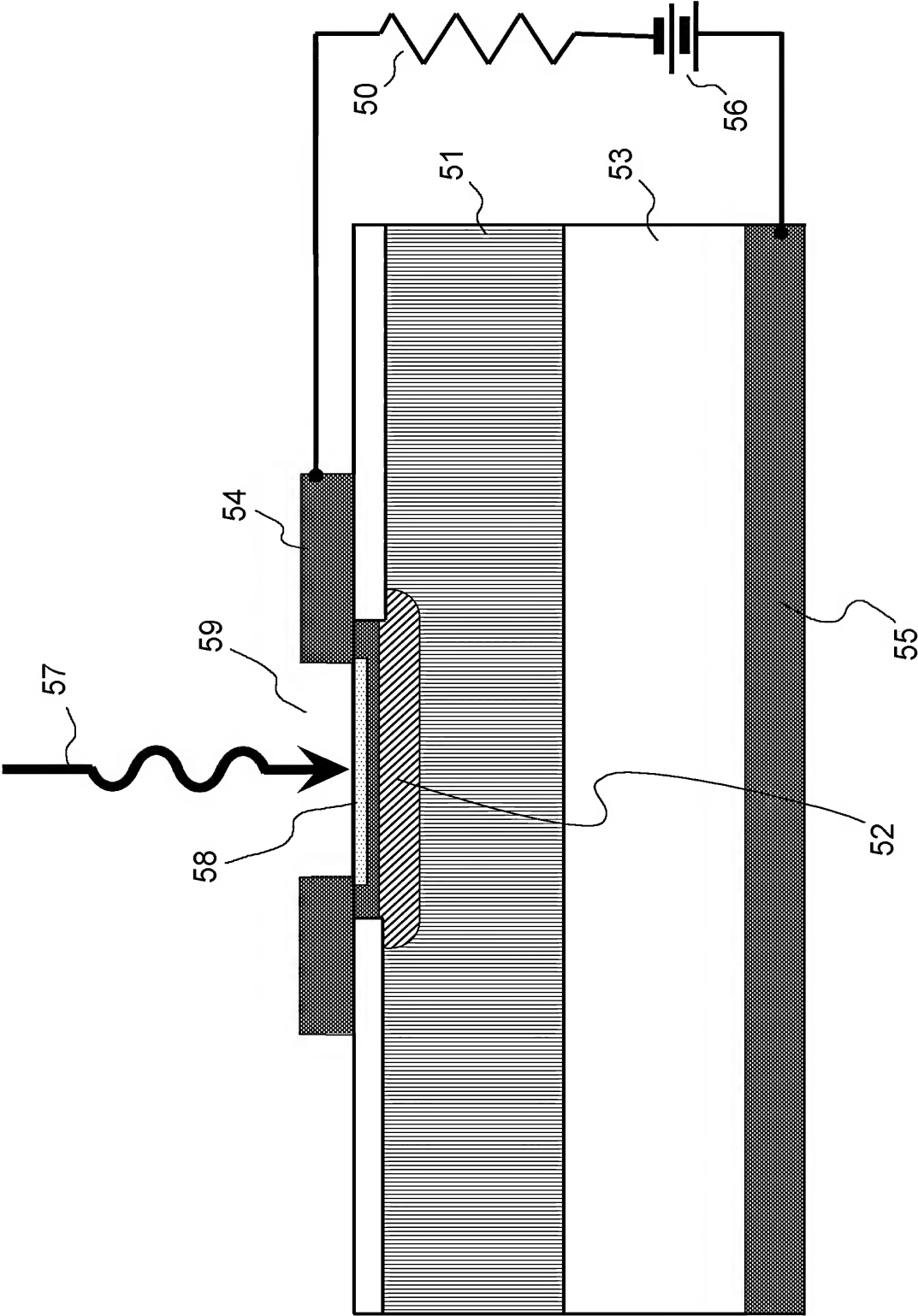
[23] 筐体と、
前記光ファイバと前記フォトダイオードとを光結合させる手段と、
を有し、
前記フォトダイオードと前記プリアンプとが前記筐体内に收容されている、請求項23に記載の光モジュール。

[24] 第1の光ファイバから出射した光が入射して第1の信号電流を発生する請求項1または5に記載のフォトダイオードと、
第2の光ファイバに入射される信号光を発生する光源と、
前記フォトダイオードおよび前記光源が配置した搭載ボードと、
を有し、前記第1の信号電流がLSIに供給され、前記LSIからの第2の信号電流に応じて前記光源が信号光を発生することを特徴とする、光インターコネクトモジュール。

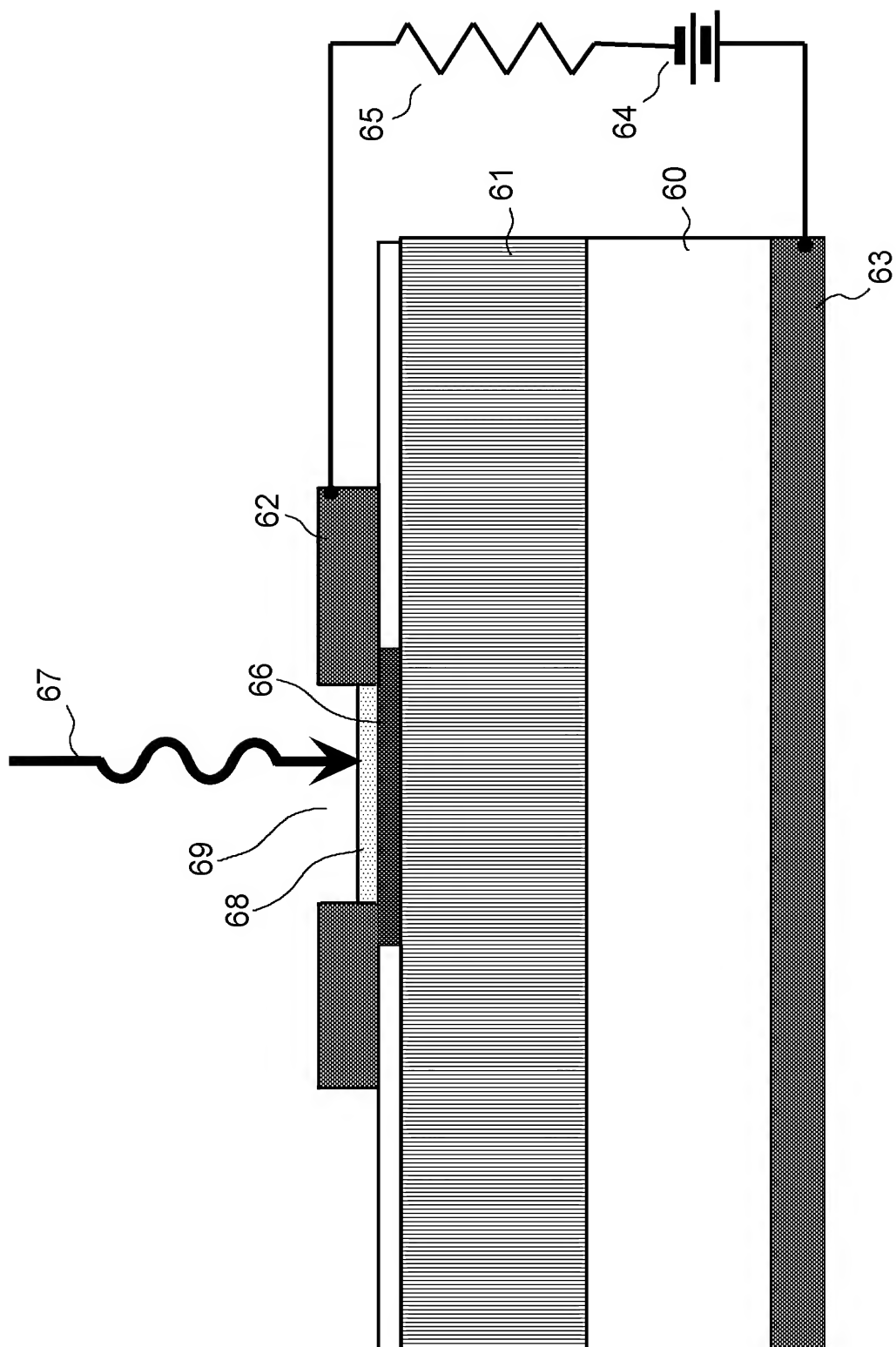
[25] 前記第1の光ファイバと前記フォトダイオードとを光結合させる第1の結合手段と、前

記光源と前記第2の光ファイバとを光結合させる第2の結合手段とを有する、請求項2
4に記載の光インターコネクトモジュール。

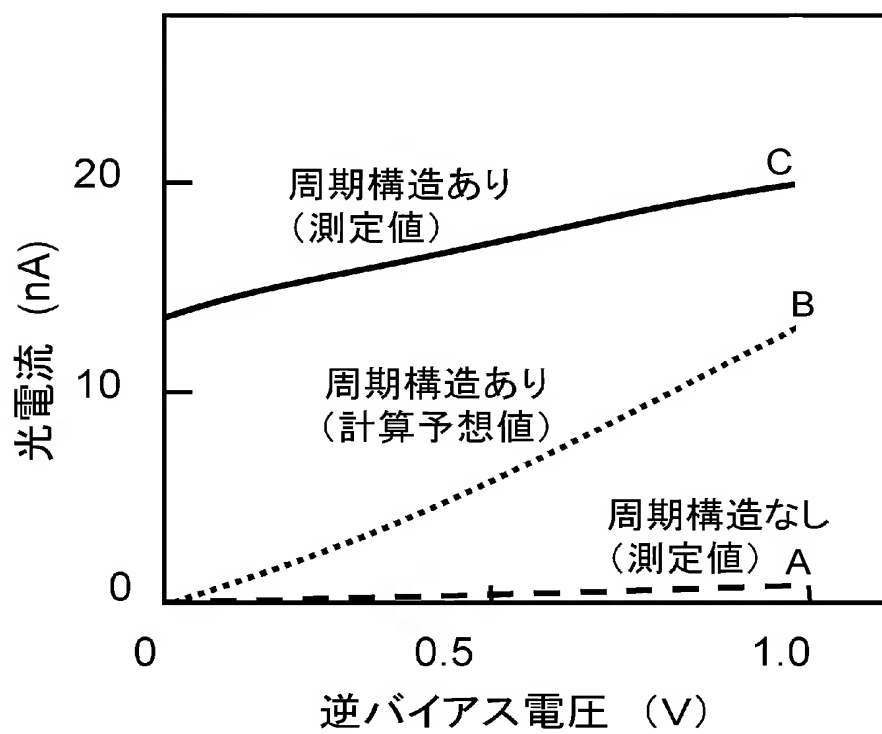
[図1]



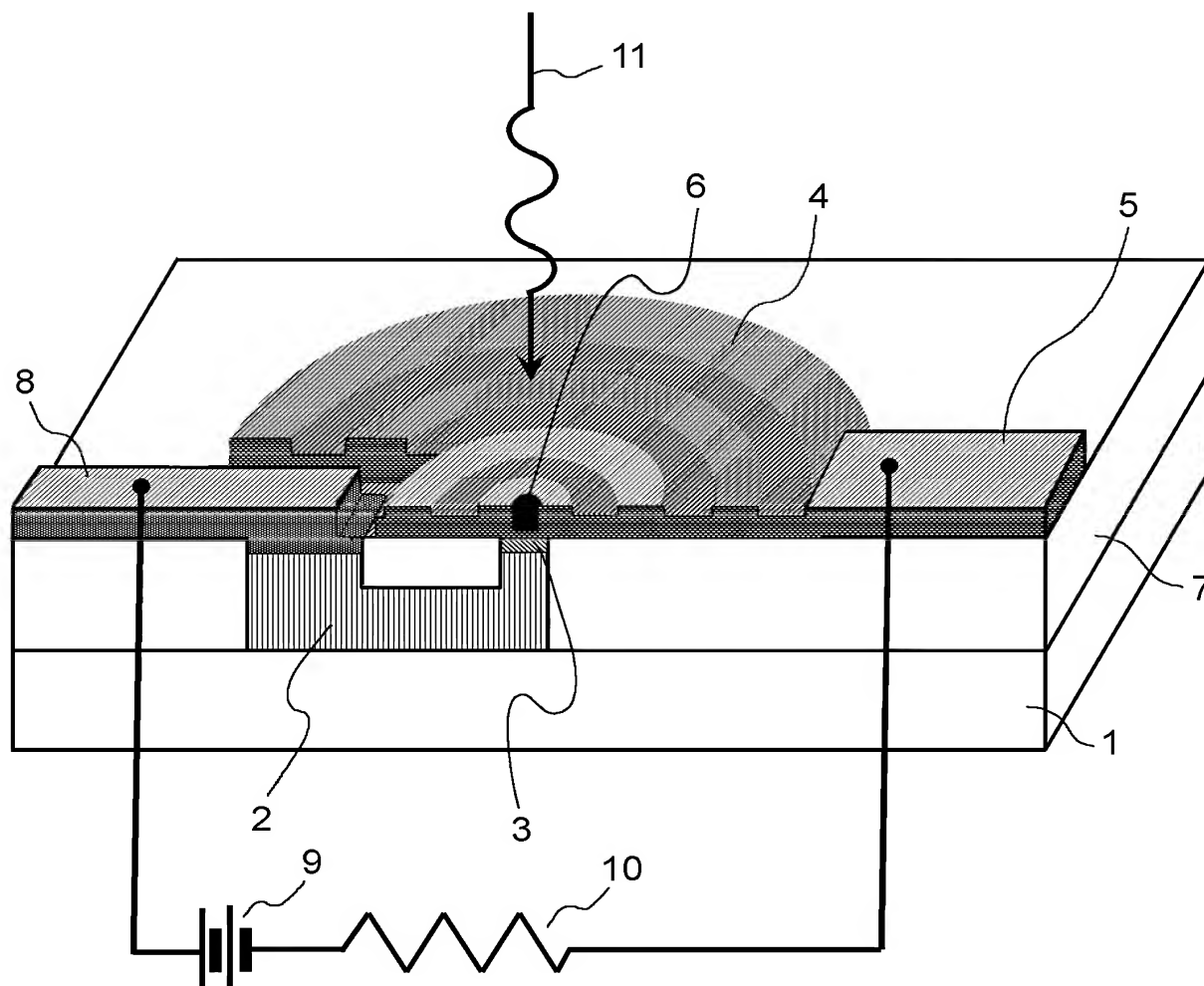
[図2]



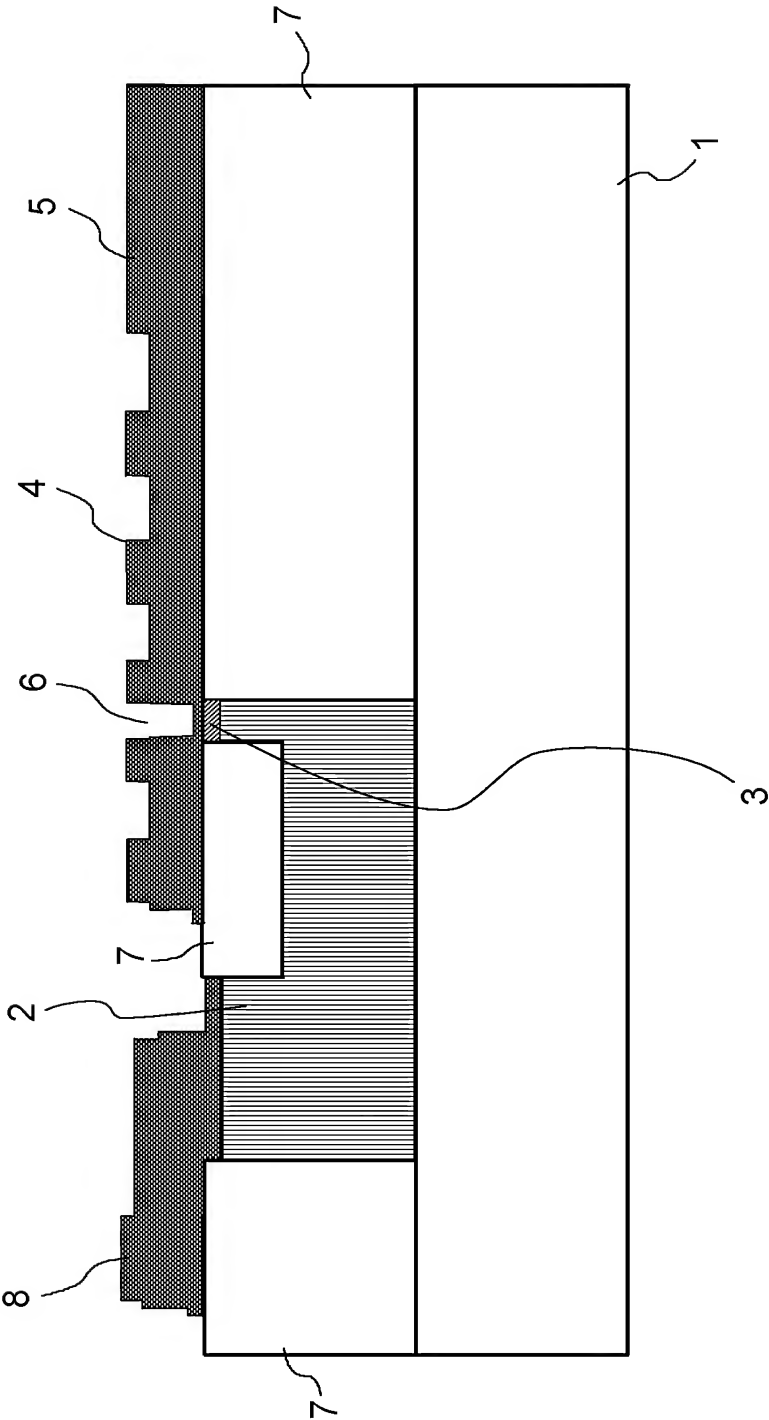
[図3]



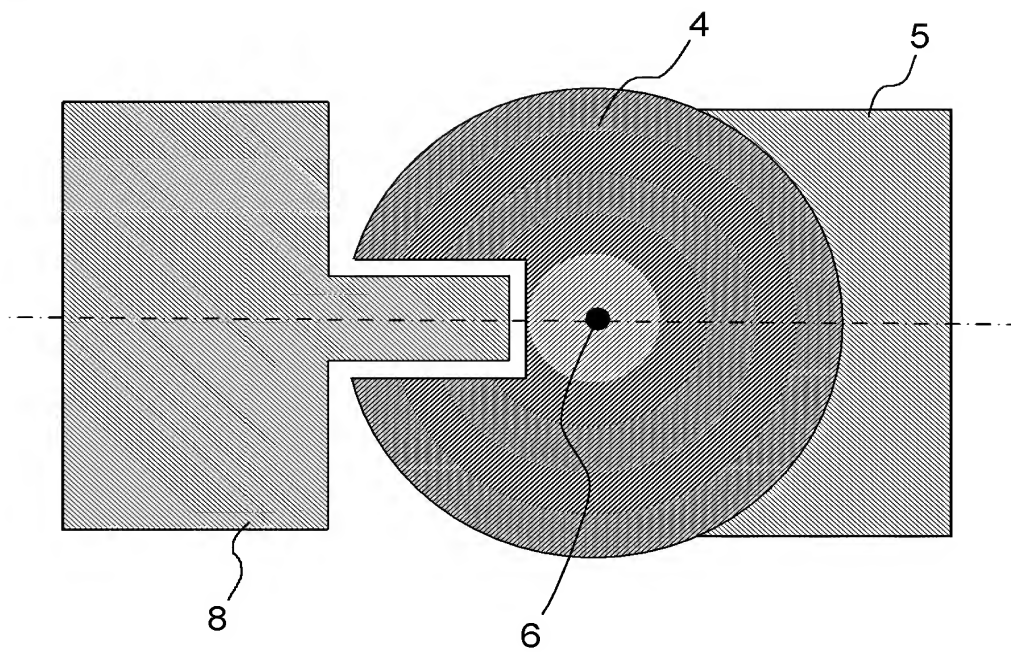
[図4]



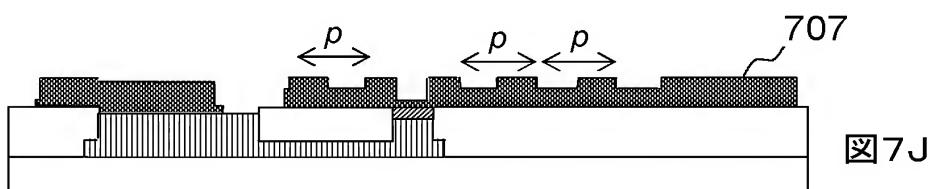
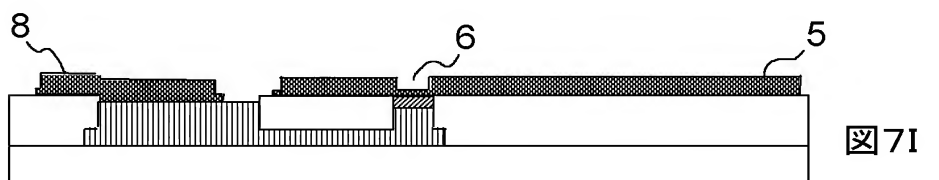
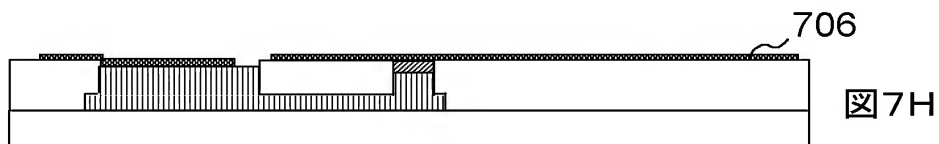
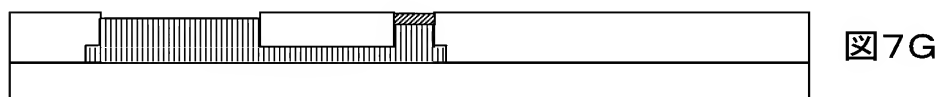
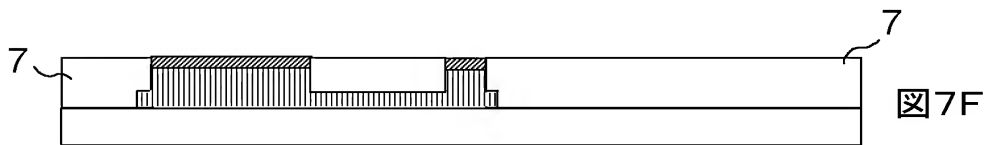
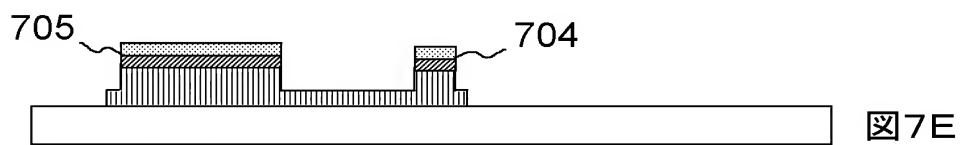
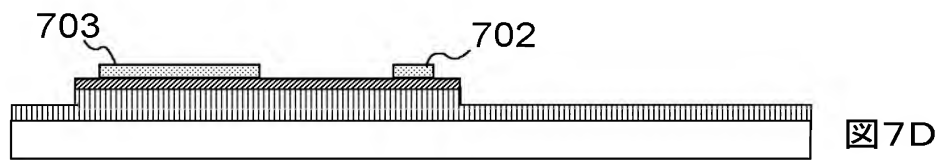
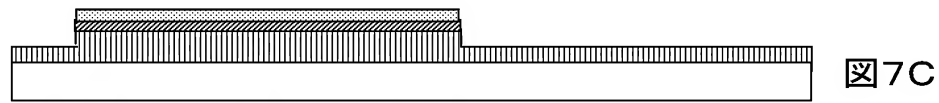
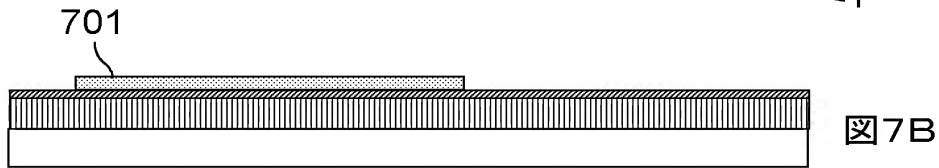
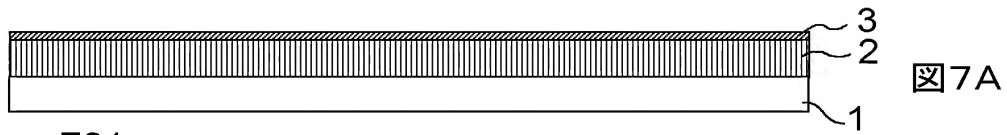
[図5]



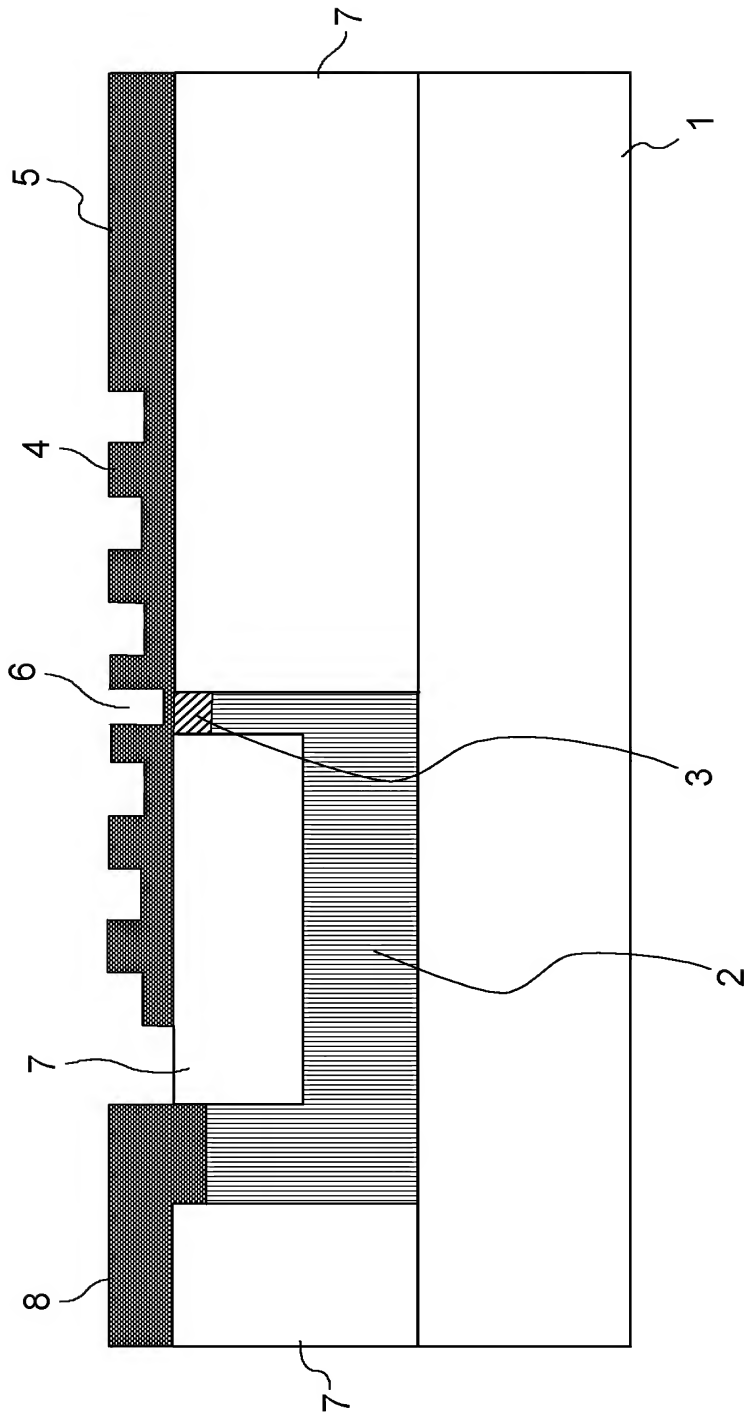
[図6]



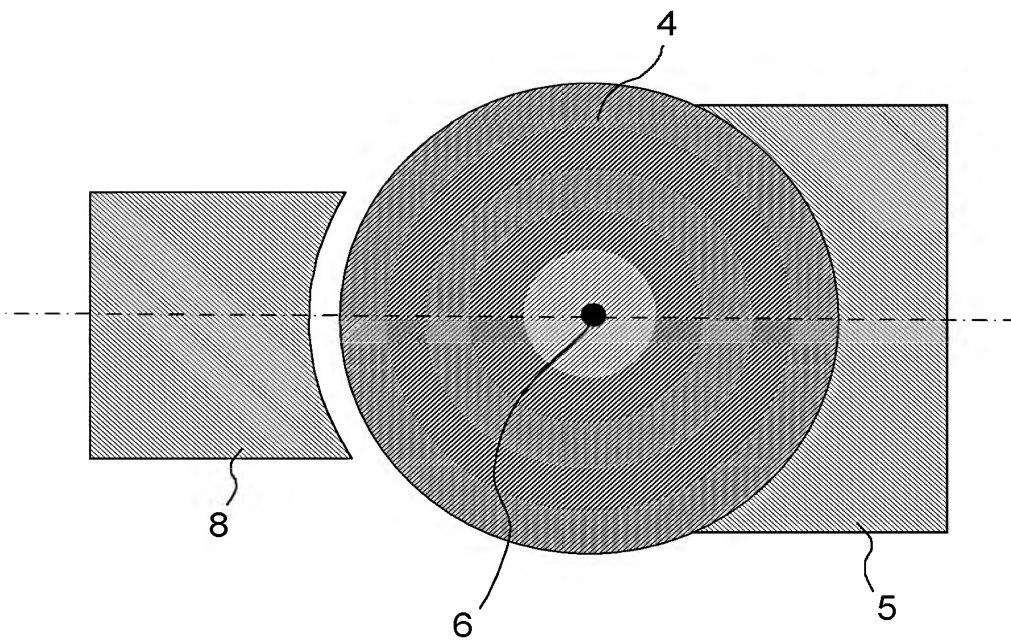
[図7]



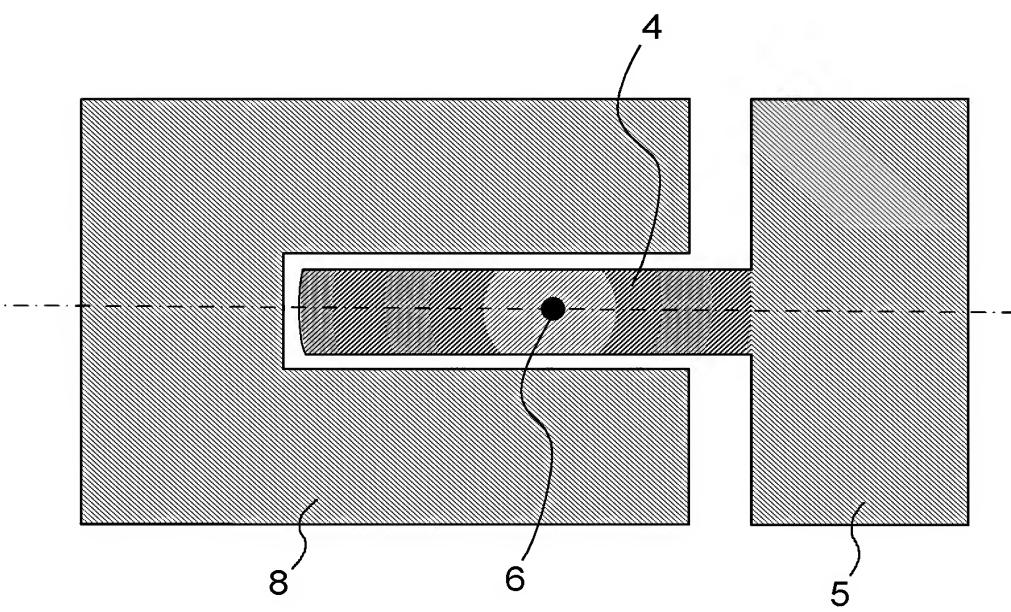
[図8]



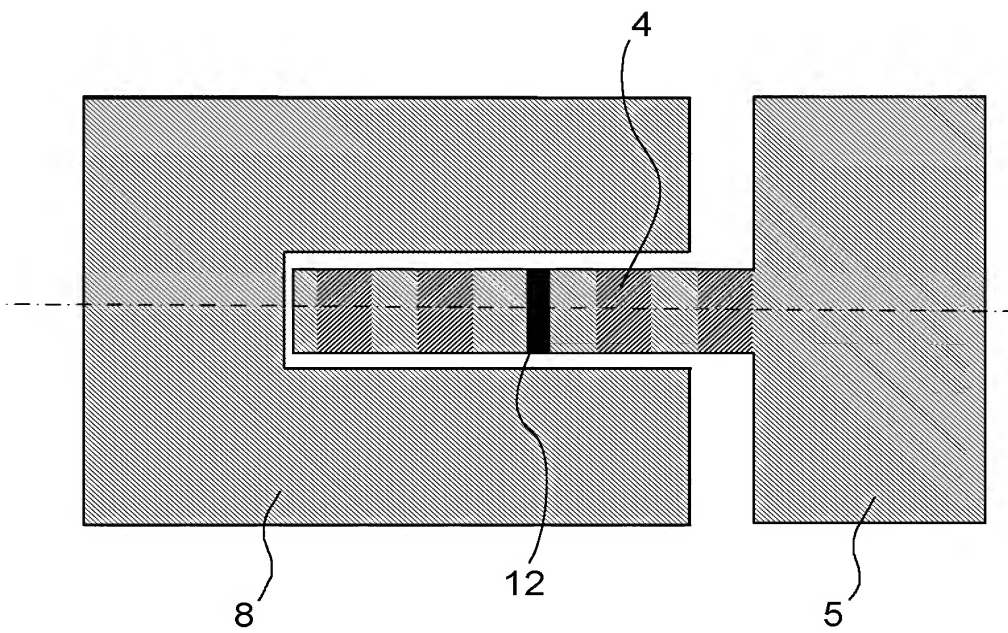
[図9]



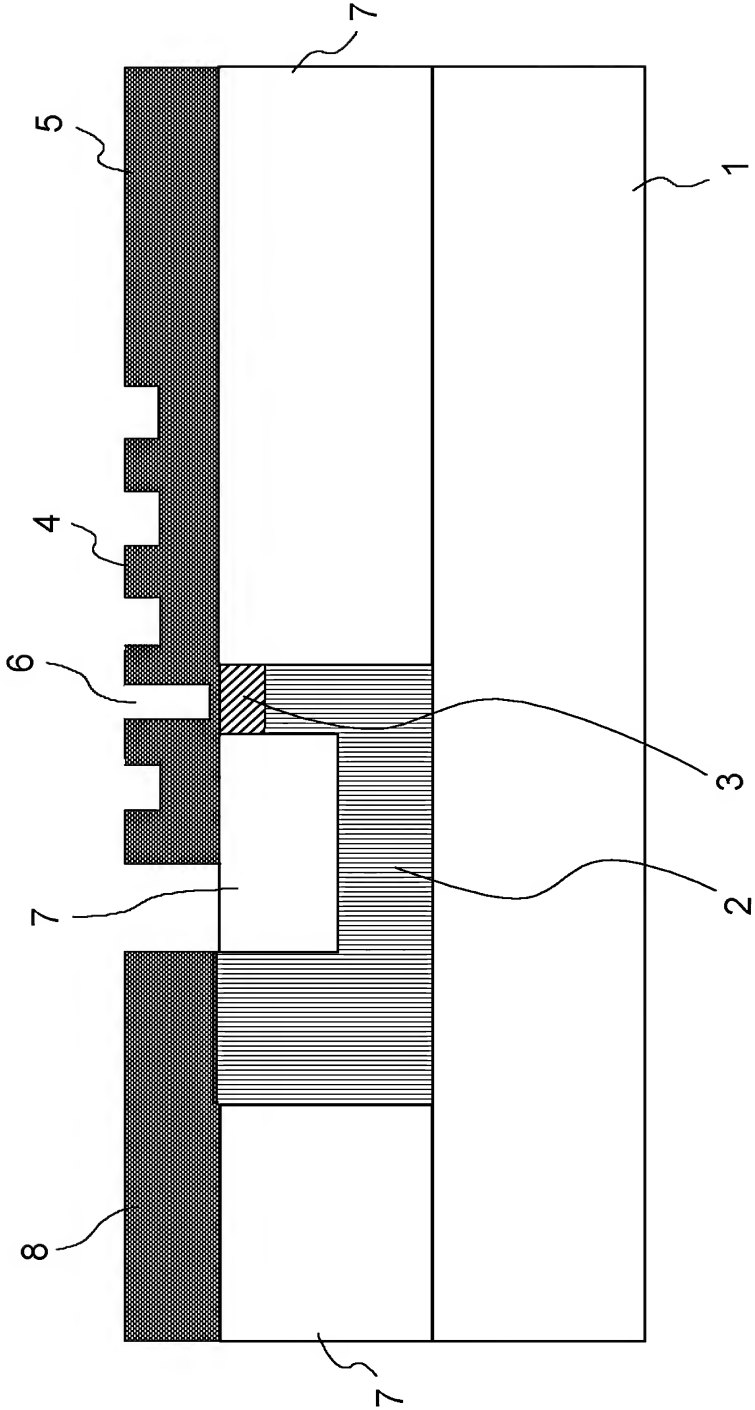
[図10]



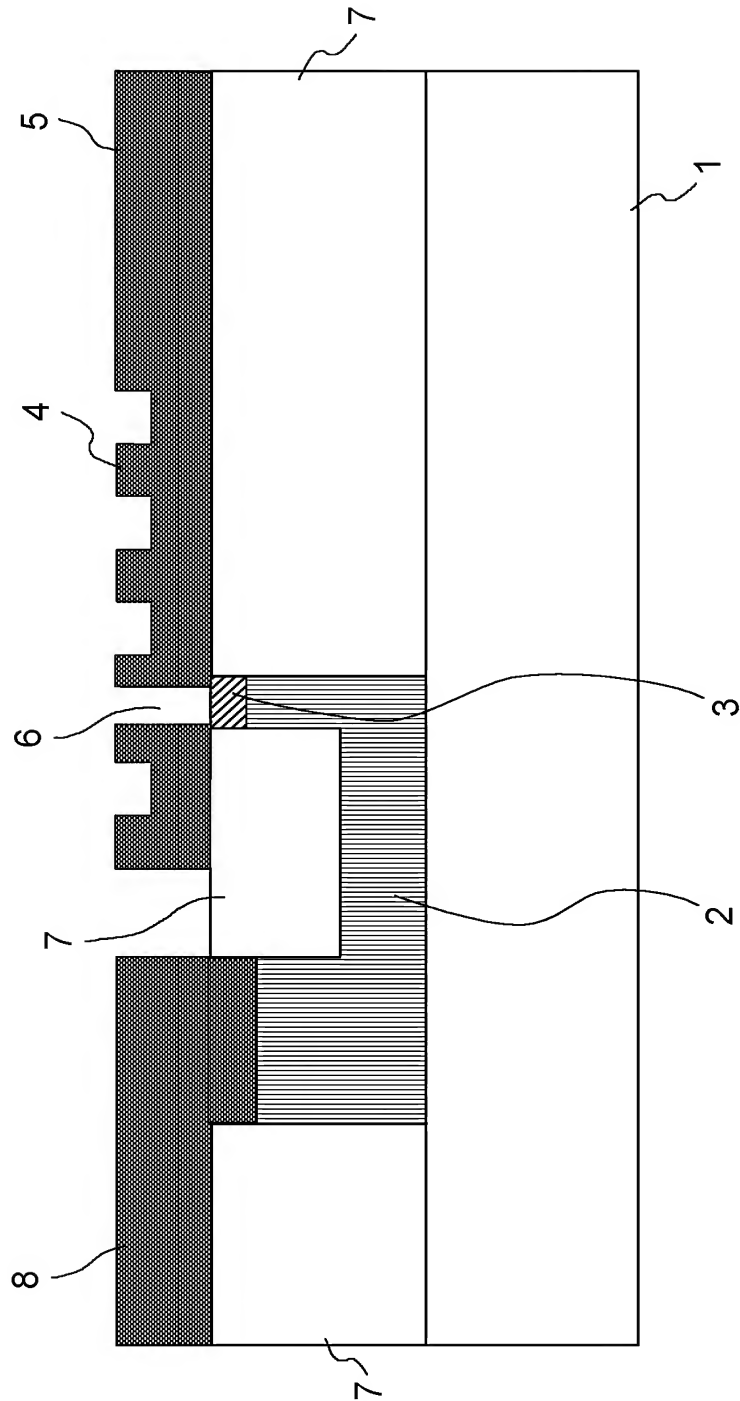
[図11]



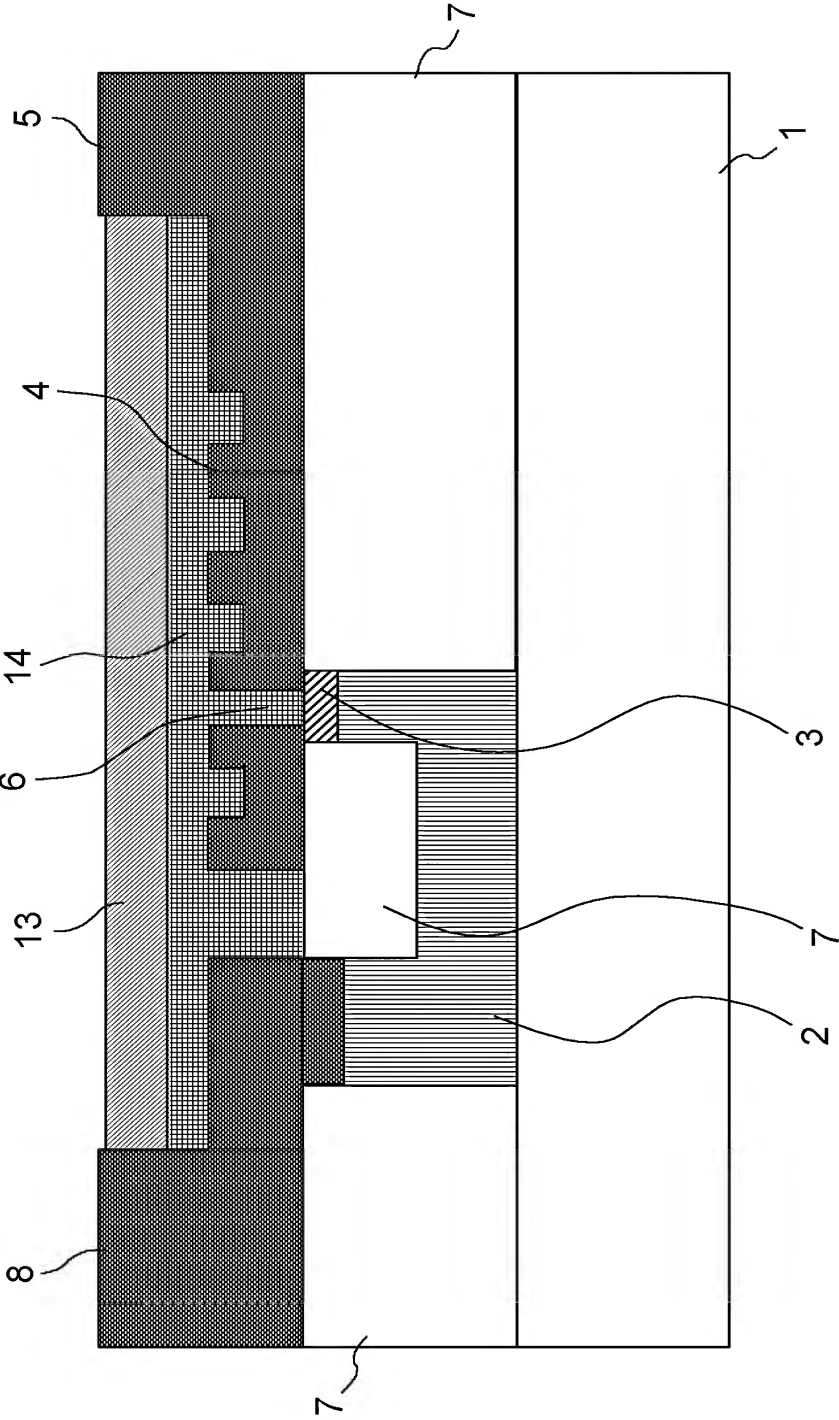
[図12]



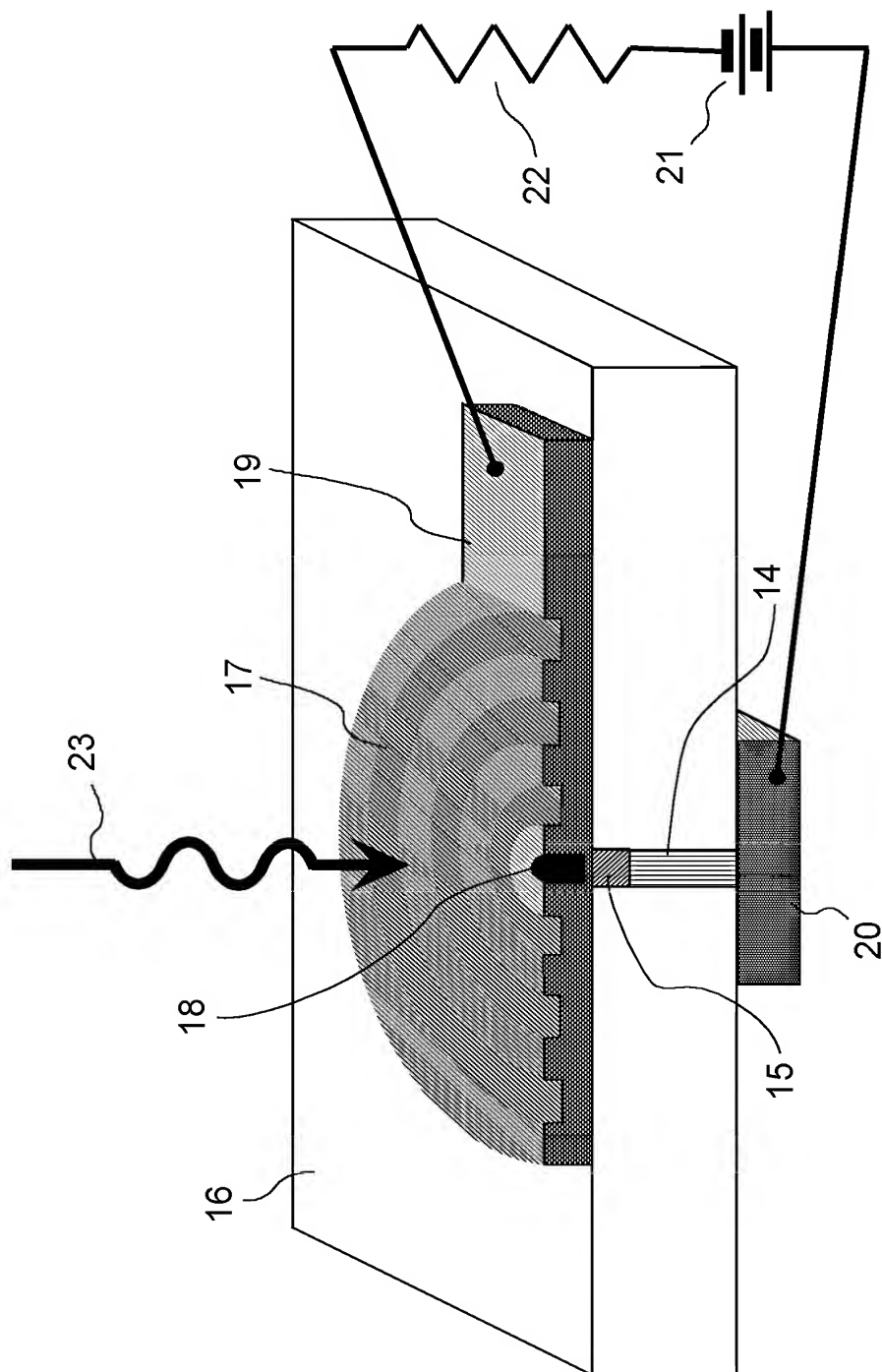
[図13]



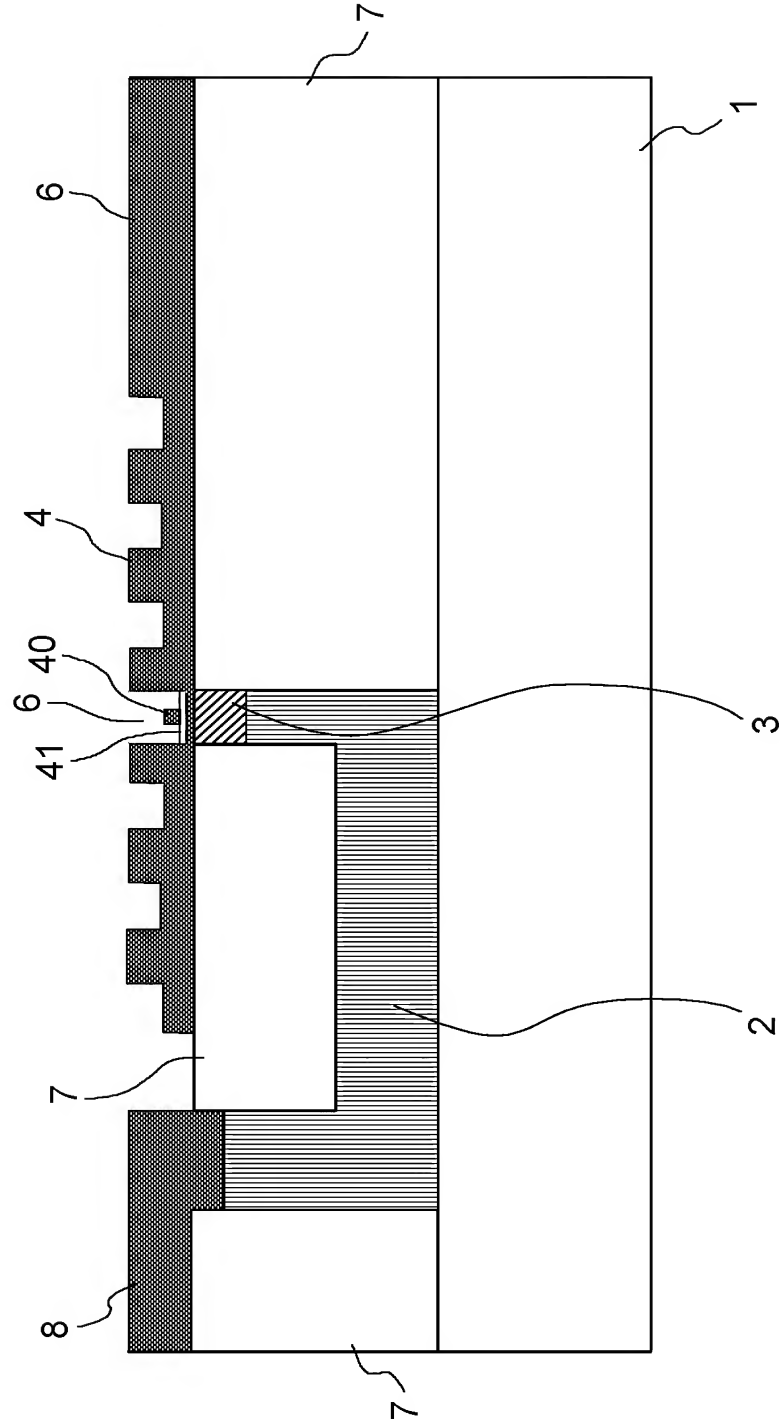
[図14]



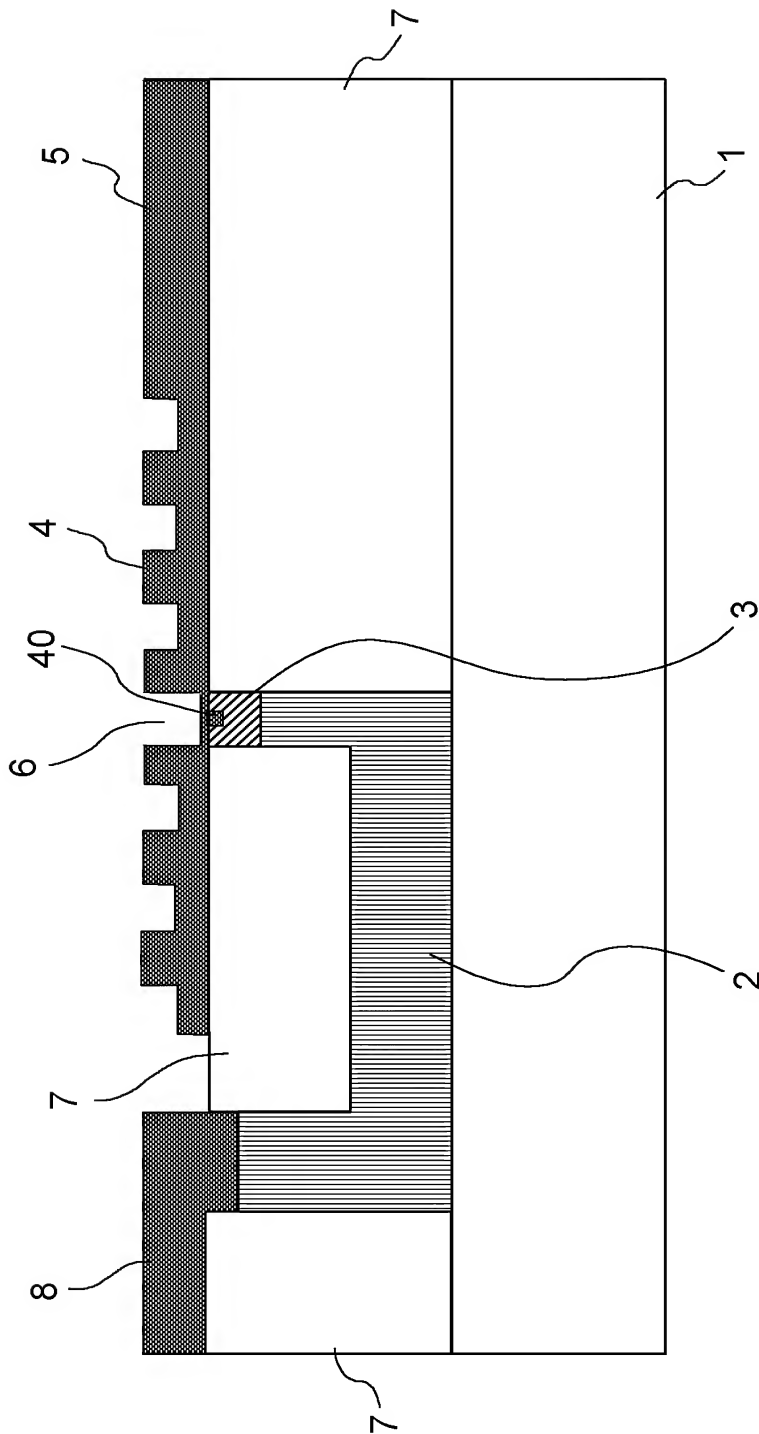
[図15]



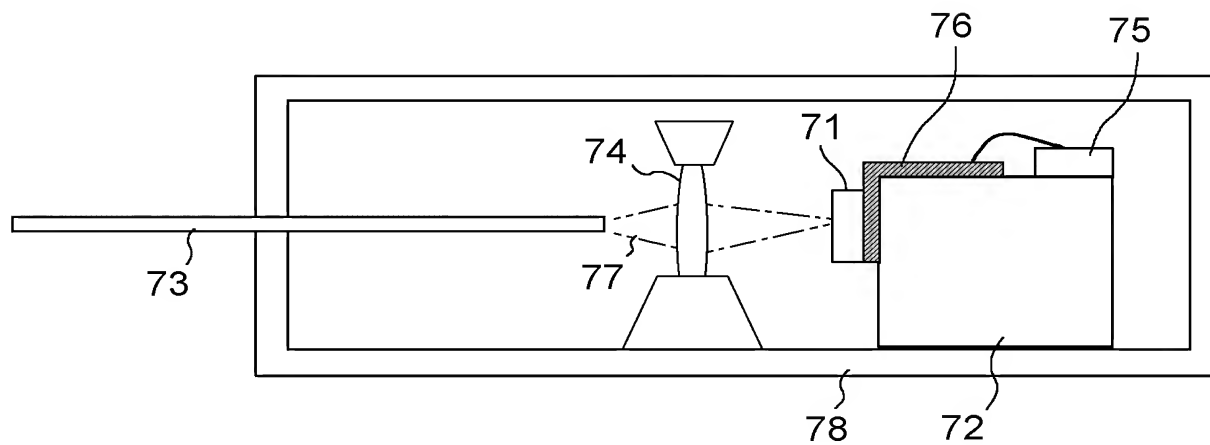
[図16]



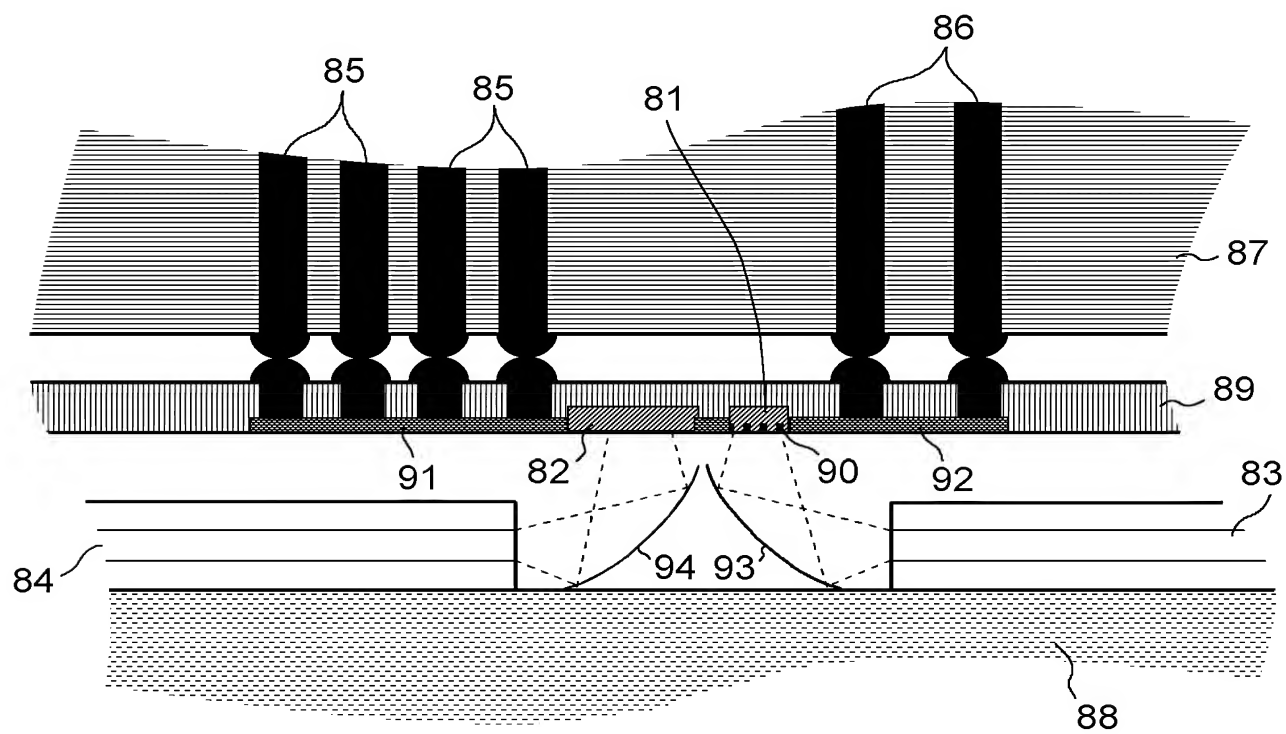
[図17]



[図18]



[図19]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2005/006660

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
Int.Cl.⁷ H01L31/0216

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
Int.Cl.⁷ H01L31, G02B5

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2005
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2005 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2005

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2003-287656 A (NEC Corp.), 10 October, 2003 (10.10.03), & US 2003/0185135 A	1-25
Y	US 2003/0173501 A (Thio), 18 September, 2003 (18.09.03), (Family: none)	1-25
Y	US 6236033 B (Ebbesen), 22 May, 2001 (22.05.01), & EP 1008870 A & JP 2000-171763 A & JP 2004-70288 A	1-25
A	JP 2000-222765 A (Ricoh Co., Ltd.), 11 August, 2000 (11.08.00), & US 2003/0075683 A	1-25

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search
23 May, 2005 (23.05.05)

Date of mailing of the international search report
07 June, 2005 (07.06.05)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2005/006660

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
P, Y	J.Fujikata et al., "Surface Plasmon Enhancement Effect and Its Application to Near-Field Optical Recording", Transactions of the Magnetics Society of Japan, Vol.4, No.4-2, pages 255 to 259, 01 November, 2004 (01.11.04)	1-25

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl.⁷ H01L31/0216

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl.⁷ H01L31, G02B5

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2005年
日本国実用新案登録公報	1996-2005年
日本国登録実用新案公報	1994-2005年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y	J P 2003-287656 A (日本電気株式会社) 2003. 10. 10 & US 2003/0185135 A	1-25
Y	US 2003/0173501 A (Thio) 2003. 09. 18 (ファミリーなし)	1-25

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献
「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

23. 05. 2005

国際調査報告の発送日

07. 6. 2005

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

濱田 聖司

電話番号 03-3581-1101 内線 3255

2K

9207

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y	US 6 2 3 6 0 3 3 B (Ebbesen) 2 0 0 1 . 0 5 . 2 2 & EP 1 0 0 8 8 7 0 A & JP 2 0 0 0 - 1 7 1 7 6 3 A & JP 2 0 0 4 - 7 0 2 8 8 A	1 - 2 5
A	JP 2 0 0 0 - 2 2 2 7 6 5 A (株式会社リコー) 2 0 0 0 . 0 8 . 1 1 & US 2 0 0 3 / 0 0 7 5 6 8 3 A	1 - 2 5
P Y	J.Fujikata et al., "Surface Plasmon Enhancement Effect and Its Application to Near-Field Optical Recording", Transactions of the Magnetics Society of Japan, Vol. 4, No. 4-2, pp. 255-259, (2004.11.01)	1 - 2 5